

**Band
431**

Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

Roman Dumitrescu
Katharina Hözlé (Hrsg.)

Vorausschau und Technologieplanung

**19. Symposium für
Vorausschau und Technologieplanung**

23. und 24. Oktober 2025
Berlin

Roman Dumitrescu
Katharina Hölzle (Hrsg.)

Vorausschau und Technologieplanung

19. Symposium für
Vorausschau und Technologieplanung
23. und 24. Oktober 2025
Berlin

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Band 431 der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2025

ISSN (Print): 2195-5239

ISSN (Online): 2365-4422

ISBN: 978-3-947647-50-7

Das Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Herausgeber und des Verfassers unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Als elektronische Version frei verfügbar über die Digitalen Sammlungen der Universitätsbibliothek Paderborn.

Satz und Gestaltung: Timm Fichtler, Leonie Happe, Beke Marie Kröger, Lea-Sophie Mirasch

Vorwort

Erfolgreiche Unternehmensführung beruht zu einem erheblichen Teil auf der regelmäßigen und systematischen Antizipation zukünftiger Markt- und Technologieentwicklungen. Daraus ergeben sich Chancen, aber auch Gefahren für das etablierte Geschäft. Methoden der Vorausschau und Technologieplanung helfen, schlüssige Konzepte für das Geschäft von morgen zu erarbeiten.

Wir haben ein vitales Interesse an einem intensiven Dialog mit der Fachwelt; aus diesem Grund veranstalten wir jährlich das „Symposium für Vorausschau und Technologieplanung“ mit qualitativ hochwertigen Beiträgen. Der vorliegende Band soll diesem Anspruch gerecht werden. Für die Begutachtung und Auswahl der Beiträge danken wir den Mitgliedern des Programmkomitees herzlich.

Dr. R. E. Achatz, thyssenkrupp AG	T. Pfänder, UNITY AG
Prof. Dr. ETH R. Boutellier, ETH Zürich	Prof. Dr. F. T. Piller, RWTH Aachen
Dr. ETH B. Capaul, BC2 Dr. Beatrice Capaul Consulting	Prof. Dr. R. Rohrbeck, EDHEC Business School
Dr. R. Feurer, BMW AG	Prof. Dr.-Ing. S. Schimpf, Fraunhofer-Verbund Innovationsforschung
Prof. Dr.-Ing. J. Franke, FAU Erlangen-Nürnberg	Dr.-Ing. B. C. Schmidt, Hitachi Energy Ltd.
Dr. A. Frey, acatech	Prof. Dr. A. Schönmann, Technische Hochschule Ingolstadt
Prof. Dr.-Ing. V. Grienitz, Hochschule Wismar	Prof. Dr. M. Schraudner, Fraunhofer CeRRI
A. Hagemann, Cicor Management AG	Prof. Dr.-Ing. G. Schuh, RWTH Aachen
Dr. S. Kimpeler, Fraunhofer ISI	Prof. Dr.-Ing. A. Siebe, Zukunftsingenieur
Dr.-Ing. C. Koldewey, Heinz Nixdorf Institut	Prof. Dr.-Ing. D. Specht, BTU Cottbus
Dr.-Ing. A. Kühn, Fraunhofer IEM	Dr.-Ing. K. Stoll, Dr. Stoll Growth Consulting & Coaching GmbH
Prof. Dr. M. Lauster, Fraunhofer INT	Prof. Dr. K.-I. Voigt, FAU Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann, TU München	Prof. Dr. M. Weissenberger-Eibl, Fraunhofer ISI und KIT
Dr.-Ing. J. S. Michels, Weidmüller Interface GmbH & Co. KG	Prof. Dr. T. Wulf, Philipps-Universität Marburg
Prof. Dr. M. Möhrle, Universität Bremen	Dr. J. Winter, L3S Research Centre
Prof. Dr. T. Müller-Kirschbaum, tmk-expertise	

Die Insider wissen, dass eine derartige Veranstaltung & Publikation viel Arbeit erfordern. Stellvertretend für die vielen hilfreichen Geister im Hintergrund sei Timm Fichtler, Leonie Happe, Beke Marie Kröger & Leon Rasztar gedankt, denen die Organisation des Ganzen oblag.

Dezember 2025

Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu

Prof. Dr. Katharina Hölzle

Inhaltsverzeichnis

Session I

<i>M. Brunner, M. A. Weissenberger-Eibl, W. Müller-Pietrella</i>	
Kontextualisierte Akzeptanz: Die Rolle von Szenarien bei der Erforschung der öffentlichen Wahrnehmung von Climate-Engineering-Maßnahmen	9
<i>A.-V. Faix, H. v. d. Gracht, S. Kisgen</i>	
From Uncertainty to Direction: Delphi-Methodik und Szenario-Planung als Innovationskompass im Zeitalter von KI und Quantumcomputing	29

Session II

<i>M. Busch, D. Kumar, B. Jain, J. Valentowitsch, D. Wurster</i>	
Fallstudienbasierte Analyse der Integration generativer KI-Werkzeuge in die strategische Vorausschau	55
<i>F. Bickert, M. Maier, S. Kaiser, K. Hözle</i>	
Kollaborative Mensch-KI-Interaktion für datengestützte Vorausschau: Ein Human-in-the-Loop-Ansatz zum Trendmonitoring im Bereich Quantencomputing ...	73

Session III

<i>C. Thümmel, M. Kuebler, A. Siebe, T. Düser, A. Albers</i>	
Anwendung einer Systematik für Monitoring zur Bedarfsvalidierung zwischen Vorausschau und Produktentwicklung im Projekt SofDCar	93
<i>R. Zowalla, J. Mackensen, M. Jin, K. Schaefer, S. Omri, J. Neuhüttler</i>	
Intelligentes Web Crawling für die industrielle Trendanalyse: Eine skalierbare KI-gestützte Architektur	113

Session IV

<i>V. Dondorf, K. Kokilanathan, J. Graunke, D. Hobscheidt, R. Dumitrescu</i>	
Akzeptanz von KI-Lösungen: Analyse der Einflussfaktoren und ihre Relevanz für Mitarbeitende	137
<i>L. Steiert, L. Wohlfart, B. Schneider, S. Schüle, K. Hözle</i>	
Einsatz von Künstlicher Intelligenz bei der Entwicklung von Zukunftsszenarien am Beispiel der Haushaltsgerätebranche	157

Session V

F. Sturm, D. Freudendahl, M. Gallasch, S. Schimpf
(Technologie-)Roadmapping in Forschungsorganisationen:
Herausforderungen und Gestaltungshinweise 177

V. Grienitz
Technology-Canvas und Technology-Deep-Dives – Wissensaggregation durch
ausgewogene Technology Push- und Market Pull-Darstellung 197

Session VI

T. S. Kranzle
Playful Machines – Der Einfluss von Verspieltheit auf die Ideenfindungsleistung
von Large Language Models 225

S. M. Lang, C. Zanker, S. Glöser-Chahoud, M. Wiens
Vorausschauende Risiko- und Resilienzbewertung von Lieferketten 243

Session VII

M. Kuebler, M. Bräuner, C. Thümmel, A. Siebe, T. Düser, A. Albers
Upgradefähige mechatronische Systeme – Eine Unterstützung zur Priorisierung
von Entwicklungsaktivitäten auf Basis sich ändernder Produkteigenschaften 263

K. Kleine, A. Schönmann, J. O. Schwarz
Ein methodisches Framework zur kombinierten Bewertung technologischer und
marktwirtschaftlicher Reife 281

Session VIII

F. Dohmann, D. Hobscheidt, G. V. Vo, C. K. Kürpick, R. Dumitrescu
Nachhaltigkeit als strategischer Erfolgsfaktor – ein Framework für die
unternehmerische Nachhaltigkeitstransformation 299

M. Feldwieser, C. Yapıcı, P. Ciziroglou
Mobilität der Zukunft: Erfolgsfaktoren zur Integration autonomer Shuttles in den
ÖPNV 321

Best Paper

S. Braun, V. Borkmann, K. Dienes, F. Schubert, J. Cichocki
Quartiere als urbane Kornkammern und Outside-In-Perspective: Strategische
Vorausschau und Potenziale für hyperlokale Lebensmittelproduktion in
zirkulären Stadtsystemen 341

Session I

Kontextualisierte Akzeptanz: Die Rolle von Szenarien bei der Erforschung der öffentlichen Wahrnehmung von Climate-Engineering-Maßnahmen

Marina Brunner¹, Marion A. Weissenberger-Eibl^{1,2}, Wolfgang Müller-Pietralla³

¹ Lehrstuhl für Innovations- und TechnologieManagement (iTUM),

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), marina.brunner@kit.edu

² Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, marion.weissenberger-eibl@kit.edu

³ Volkswagen AG, wmuepie@icloud.com

Zusammenfassung

Climate-Engineering-(CE)-Maßnahmen werden zunehmend als potenzielle Ergänzung zu bestehenden Klimaschutzstrategien diskutiert und sind in zahlreichen Klimamodellen bereits als feste Bestandteile verankert [IPC18]. Für die weitere Erforschung und zukünftige Implementierung stellt die gesellschaftliche Akzeptanz der Maßnahmen eine zentrale Hürde dar [Cru06]. So hat öffentlicher Widerstand in der Vergangenheit vielfach zur Ablehnung von Feldversuchen geführt [LBS22]. Deshalb bedarf es einer differenzierteren Erforschung der öffentlichen Wahrnehmung von CE-Maßnahmen.

Bisherige Studien konzentrieren sich häufig auf die isolierte Bewertung einzelner CE-Technologien, ohne deren systemische Einbettung zu berücksichtigen. Neuere Untersuchungen heben jedoch hervor, dass diese systemische Perspektive entscheidend für die gesellschaftliche Bewertung von CE ist [Bel22, BLP19, CY18]. An dieser Forschungslücke setzt die vorliegende Studie an und entwickelt einen szenariobasierten Ansatz zur Untersuchung von Akzeptanzkontexten für CE-Maßnahmen.

Exemplarisch wurden die Technologien Stratospheric Aerosol Injection (SAI) und Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCs) analysiert. Basierend auf elf Expert:inneninterviews wurden zentrale Einflussfaktoren identifiziert und im Rahmen eines systematisch formalisierten Szenarioentwicklungsprozesses nach den fünf Phasen von Kosow und Gaßner (2008) in vier Zukunftsszenarien überführt. Diese Szenarien dienten als Diskussionsgrundlage für acht Fokusgruppen mit insgesamt 45 Teilnehmenden zur Erforschung der CE-Akzeptanz.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Einbettung von CE-Technologien in unterschiedliche soziotechnische Kontexte ihre Wahrnehmung maßgeblich beeinflusst. Zudem traten in der Auseinandersetzung mit narrativen Zukunftsszenarien neue Argumentationsmuster auf, die in technikorientierten Einzelbetrachtungen bisher unberücksichtigt bleiben. Die Studie verdeutlicht das Potenzial der Szenariotechnik als methodisches Instrument zur differenzierten Analyse von Akzeptanzkontexten für neue Zukunftstechnologien.

Schlüsselworte

Climate Engineering, Öffentliche Wahrnehmung, Szenario Technik, Akzeptanzkontext

Contextualized Acceptance: The Role of Scenarios in Exploring Public Perception of Climate Engineering Measures

Abstract

Climate Engineering (CE) measures are increasingly being discussed as potential complements to existing climate protection strategies and are already firmly embedded in numerous climate models [IPC18]. However, societal acceptance of these measures poses a significant hurdle for further research and future implementation [Cru06]. Public resistance has often led to the rejection of field trials in the past [LBS22]. Therefore, a more differentiated exploration of public perception of CE measures is needed.

Previous studies often focus on the isolated evaluation of individual CE technologies without considering their systemic integration. However, recent studies highlight that this systemic perspective is crucial for the societal evaluation of CE [Bel22, BLP19, CY18]. This study addresses this research gap by developing a scenario-based approach to investigate acceptance contexts for CE measures.

The technologies Stratospheric Aerosol Injection (SAI) and Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCs) were analyzed as examples. Based on 11 expert interviews, key influencing factors were identified and transformed into four future scenarios through a systematically formalized scenario development process following the five phases of Kosow and Gaßner (2008). These scenarios served as a basis for discussion in eight focus groups with a total of 45 participants to explore CE acceptance.

The results show that the integration of CE technologies into different socio-technical contexts significantly influences their perception. Additionally, new patterns of argumentation emerged in the discussion of narrative future scenarios that had previously been overlooked in technology-oriented individual assessments. The study illustrates the potential of scenario techniques as a methodological tool for the differentiated analysis of acceptance contexts for new future technologies.

Keywords

Climate Engineering, Public Perception, Scenario Technique, Acceptance Context

1 Einführung

Die Idee der Klimakontrolle ist nicht neu [Cru06], hat aber im Zusammenhang mit dem anthropogenen Klimawandel zunehmend an Bedeutung gewonnen. Climate Engineering (CE), auch Geoengineering genannt, ist ein Oberbegriff für Maßnahmen, die zur aktiven Beeinflussung des Klimas angewendet werden. The Royal Society beschreibt Geoengineering als "deliberate large-scale manipulation of the planetary environment to counteract anthropogenic climate change" [The09, S. 1]. CE-Maßnahmen lassen sich anhand zweier Oberbegriffe untergliedern: Carbon-Dioxid-Removal (CDR) Maßnahmen entfernen Kohlendioxid aus der Atmosphäre und speichern es langfristig. Während beim Radiation Management (RM) ein Teil des einfallenden Sonnenlichts reflektiert wird, um die globale Durchschnittstemperatur zu senken [The09].

Diese Maßnahmen bieten vielversprechende Möglichkeiten, bergen aber auch negative Technikfolgen und unbeabsichtigte Nebenwirkungen, was in der Öffentlichkeit bereits zu wachsender Besorgnis und Ängsten geführt hat [KK17]. So wurden geplante CE-Feldexperimente, wie bspw. für das Projekt Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering (SPICE), infolge von öffentlichem Widerstand eingestellt [SPI10-ol]. In der Wissenschaft herrscht Konsens darüber, dass Entscheidungen über die zukünftige Implementierung von CE-Maßnahmen, deren Subvention und notwendige Regulierung stark von der gesamtgesellschaftlichen Akzeptanz der Technologien abhängig sein werden [AF15, CR14, SLS+15].

Obgleich in den vergangenen Jahren ein zunehmendes wissenschaftliches Interesse an der Erforschung gesellschaftlicher Akzeptanz von CE-Maßnahmen zu beobachten ist, fokussiert sich die bisherige Akzeptanzforschung mehrheitlich auf die Bewertung der isolierten Darstellung der Technologie, ohne deren gesellschaftliche, politische und ökologische Einbettung zu berücksichtigen. Dies ist ein Umstand, den es kritisch zu hinterfragen gilt, da der Kontext der Implementierung als maßgeblich für die gesellschaftliche Akzeptanz bewertet wird [MS13, CY18, BLP19, CPS22].

Zudem bewegen sich emergente Technologien wie CE-Maßnahmen in einem von Unsicherheit geprägten Umfeld, das nicht nur durch langfristige Transformationsprozesse und das Zusammenspiel vielfältiger Akteure, sondern auch durch die grundsätzliche Unvorhersehbarkeit zukünftiger Entwicklungen gekennzeichnet ist [Wei17]. Angesichts der Vielzahl möglicher Entwicklungspfade spricht die Zukunftsforschung in diesem Kontext nicht von einer einzigen Zukunft, sondern von einer Mehrzahl an potentiellen Zukünften [BSW19]. Diese Konstellation und die komplexen Wechselwirkungen, die die gesellschaftliche Akzeptanz von CE-Maßnahmen beeinflussen, erfordern Ansätze, die mit diesen Ungewissheiten proaktiv umgehen können.

Foresight-Ansätze, insbesondere die Methode der Szenario-Entwicklung, bieten hierfür ein geeignetes Instrumentarium. Sie ermöglichen es zukünftige Entwicklungen systematisch zu explorieren und unterschiedliche Zukunftsprojektionen einzubeziehen [Mie09]. Die daraus abgeleiteten Zukunftsszenarien dienen als Grundlage, um sich sowohl mit wünschenswerten als auch mit potenziell problematischen Entwicklungspfaden auseinanderzusetzen. Diese Szenarien können genutzt werden, um die Auswirkungen unterschiedlicher Kontextbedingungen auf

die gesellschaftliche Akzeptanz von CE-Technologien analytisch zu erfassen und unterschiedliche CE-Zukünfte vergleichend zu bewerten.

Die vorliegende Studie untersucht im Rahmen eines experimentellen Forschungsdesigns die Wahrnehmung von Stratosphärische Aerosol Injektion (SAI)- und Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCs)-Technologien. Dies geschieht unter der Zuhilfenahme von Szenario-techniken, welche die Technologien in unterschiedlichen Implementierungsszenarien kontextualisieren. Hierbei soll die folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

Welchen Einfluss hat die Anwendung von Szenarien auf die Akzeptanz der CE-Maßnahmen durch Bürger:innen?

2 Innerhalb Dimensionen der Akzeptanzforschung

Innerhalb der Akzeptanzforschung wird zwischen Akzeptanz und Akzeptabilität unterschieden. Akzeptabilität ist ein normativer Begriff und beschreibt das Ergebnis einer Prüfung der Zumutbarkeit einer Maßnahme, meist anhand eines kriterienorientierten Bewertungsverfahrens durch wissenschaftliche Expert:innen. Akzeptanz hingegen bezeichnet die tatsächliche Zustimmung in der Gesellschaft. Akzeptabilität und Akzeptanz können daher stark voneinander abweichen. [HBF+02] Der Begriff der Akzeptanz umfasst im vorliegenden Untersuchungskontext sowohl das Ausbleiben von Widerstand als auch eine aktive Unterstützung, die vor allem im Zusammenhang mit gesamtgesellschaftlichen Transformationsprozessen, wie bspw. der Energiewende eine zentrale Rolle einnimmt [SK13].

Schäfer & Keppler führen die folgende Begriffsdefinition an: "*Akzeptanz bedeutet also, dass jemand (bzw. ein näher zu definierendes Akzeptanzsubjekt) etwas (das Akzeptanzobjekt) innerhalb der jeweiligen Rahmen- oder Ausgangsbedingungen (Akzeptanzkontext) akzeptiert oder annimmt.*" [SK13, S. 16]

Das **Akzeptanzobjekt** stellt nicht zwingend ein materialistisches Artefakt dar, sondern kann sich bspw. auch auf Institutionen, politische Konzepte oder Strategien beziehen [HBF+02]. Auf das Akzeptanzobjekt wirken Faktoren, die sich mit der Eigenschaft des Objekts auseinandersetzen, hierzu gehören bspw. Kosten und Nutzen des Einsatzes einer Technologie, die individuellen oder gesellschaftlichen Risiken, Eignung der Technologie zur Bewältigung der Aufgabe und deren Ästhetik. Relevant ist hierbei, wie das Subjekt diese Faktoren wahrnimmt und bewertet [SK13].

Das **Akzeptanzsubjekt** stellt meist den Ausgangspunkt der Akzeptanzforschung dar. Es ist jene Instanz, die etwas (das Akzeptanzobjekt) akzeptiert. Das Subjekt kann in diesem Fall eine Einzelperson, eine Gruppe oder auch die Gesamtgesellschaft sein [SK13]. In Bezug auf Technikakzeptanz unterscheidet Huijts et al. zwischen der "*Citizen Acceptance*" und der "*Consumer Acceptance*". Bei CE-Maßnahmen liegt der Fokus auf Citizen Acceptance, bei der die Öffentlichkeit mit Technologien konfrontiert wird, von deren Auswirkungen sie betroffen ist, die jedoch von anderen besessen und verwaltet werden [HMS12].

Der **Akzeptanzkontext** beschreibt das Umfeld von Akzeptanzsubjekt und -objekt [HBF+02]. So wird der Akzeptanzkontext auch als „*die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen [...], in dem sich das Akzeptanzsystem bewegt*“ [SLS+05, I-2], beschrieben. Auf den Akzeptanzkontext wirken alle Faktoren, die nicht direkt auf das Subjekt oder das Objekt bezogen sind und von außen die Bewertung des Akzeptanzsubjektes gegenüber dem Objekt beeinflussen. Hierzu zählt z.B. das politische Klima oder die Wirtschaftslage sowie die Art und Weise, wie eine Technologie eingeführt wird oder wie sich der Kommunikationsprozess gestaltet [SK13].

Akzeptanzsubjekt, -objekt und -kontext interagieren und beeinflussen sich gegenseitig. Das Zusammenwirken dieser Komponenten bestimmt, wie und mit welchem Ausgang der Prozess der Akzeptanzentstehung verläuft. Eine adäquate Analyse des Akzeptanzkonstrukts ist demnach nur möglich, wenn der Dreiklang von Subjekt, Objekt und Kontext berücksichtigt wird [SLS+05, HBF+02].

3 CE-Akzeptanzforschung

Die bisherige Akzeptanzforschung zu CE-Technologien konzentriert sich vor allem auf Akzeptanzobjekte und -subjekte, während der systemische und kontextuelle Rahmen ihrer Anwendung meist vernachlässigt wird. [BMP+18, MPK+15, MP16]. Bellarym (2019) betont, dass die öffentliche Meinung sich nicht allein in Bezug auf die technischen Merkmale der Technologie bildet, sondern vielmehr auf Grund der eng gekoppelten soziotechnischen Systeme, in die die Technologiemarkmale eingebettet sind:

„Der Grad der öffentlichen Unterstützung für eine bestimmte technische Lösung hängt davon ab, wie sie in umfassendere soziotechnische Systeme und politische Rahmenbedingungen eingebettet ist. Weitere Forschungen zur öffentlichen Wahrnehmung und zur sozialen Akzeptanz der Kohlendioxidentfernung müssen daher jede technologische Alternative im spezifischen politischen und soziopolitischen Kontext betrachten.“ [BLP19, S. 7].

Cox et al. (2022) bestätigen diese Erkenntnisse und verdeutlichen, dass Risikokonzepte stets in bestimmten sozioökonomischen und kulturellen Kontexten zu verstehen sind. Die öffentliche Wahrnehmung einer neuen Technologie wird demnach erheblich von dem Werturteil über das Risikoniveau bestimmt, das die Menschen zu akzeptieren bereit sind, und von den genauen Bedingungen ihrer Einführung. Zukünftige Forschung darf sich nicht nur der Betrachtung widmen, wie CE die biophysikalischen Auswirkungen des Klimawandels beeinflusst, sondern sollte auch die Art und Weise in den Blick nehmen, wie CE soziale, politische und wirtschaftliche Beziehungen auf verschiedenen Ebenen umgestalten könnte [CY18]. Befürwortung oder Ablehnung lassen sich demnach nicht ohne weiteres vorhersagen, da beides davon bedingt wird, wann, wo, in welchem Umfang und wie die Technologien umgesetzt werden [CSP22].

Die Exploration von verschiedenen Kontexten ist besonders wichtig, da der Einsatz von global wirkenden Technologien die Welt auf vielfältige Weise beeinflussen kann. Macnaght et al. (2013) beschreiben die Forschungslücke in Bezug auf RM wie folgt:

„Um die Forschung zum öffentlichen Engagement in diesem Bereich weiterzuentwickeln [...], müssen Techniken und Fähigkeiten entwickelt werden, um sich den Aufbau einer durch Solar Radiation Management möglicherweise herbeigeführten geoengineerten Zukunft vorzustellen – ihre Phänomenologie, ihre politische Ökonomie, ihre Lebenswelt.“ [MS13, S. 467].

Obwohl bisherige Studien die Lücke der fehlenden systemischen Einbettung adressieren und von Szenarien bei ihrem Studiendesign sprechen [Bel22, BLP17, BLP19], handelt es dabei nicht um holistische, systemische Szenarien, die dem Verständnis der Foresight-Forschung folgen. So wird bisher bei keiner Akzeptanzstudie zu CE ein Szenarien-Entwicklungsprozess aufgeführt. Vielmehr handelt es sich bei den Szenarien um kurze, isolierte Beschreibungen von unterschiedlichen Policy-Möglichkeiten [BLP19, PRW21], industrielle Logistikarten [BJM+21] oder Forschungsgovernance-Varianten [BLP17], die vergleichend zur Bewertung vorgestellt werden.

Resümierend lässt sich hervorheben, dass die Akzeptanz von CE als stark bedingungsabhängig eingeschätzt wird [CY18]. Die formulierten Bedingungen sind dabei häufig in sozio-technische Systemkontakte eingebettet und an deren zukünftige Entwicklungen geknüpft. Eine zukunftsorientierte und kontextuell eingebettete Perspektive auf CE ist für die weitere Erforschung der Akzeptanz dieser Technologien demnach nicht nur zweckmäßig, sondern notwendig.

4 Methodik

Im vorliegenden Forschungsdesign wurden Szenarien als methodisches Werkzeug eingesetzt, um die Akzeptanz von CE-Maßnahmen zu untersuchen. Im Rahmen von acht Fokusgruppen wurden 45 Teilnehmende mit den entwickelten Zukunftsszenarien konfrontiert und diskutierten diese im Hinblick auf ihre Akzeptanz. Die Szenarien dienen somit als Stimuli, die den Austausch über die Akzeptanz von CE und dessen Rahmenbedingungen fördern.

Die Szenarien zur zukünftigen Implementierung von Climate Engineering Maßnahmen wurden basierend auf den fünf Phasen von Koswo & Gaßner [KG08] unter Anwendung einer systematisch formalisierten Szenariotechnik mit kreativ-narrativen Elementen entwickelt. Der Prozess folgte einem explorativen Ansatz, bei dem ausgehend von der Gegenwart eine induktive Verknüpfung relevanter Einflussfaktoren und Trends vorgenommen wurde. Dabei wurden nur solche Einflussfaktoren für die Szenarienentwicklung herangezogen, die von Expert:innen als entscheidend für die Akzeptanz von CE-Maßnahmen bewertet wurden [FSS02].

4.1 Szenario Entwicklung nach Koswo und Gaßner

Koswo und Gaßner haben nach der Untersuchung verschiedener Szenario-Prozesse fünf übergreifende Phasen definiert, an denen sich der nachfolgende Szenario-Entwicklungsprozess orientiert: 1. Szenariofeld-Bestimmung, 2. Schlüsselfaktor-Identifikation, 3. Schlüsselfaktor-Analyse, 4. Szenario-Generierung, 5. Szenario-Transfer.

Szenariofeld-Bestimmung: Das Szenariofeld umfasst das im Szenario zu behandelnde Problem [GFS98] sowie die örtlichen und zeitlichen Dimensionen [FS11].

Bei der vorliegenden Untersuchung ist dies die Implementation von DACCS- und SAI-Maßnahmen und ihre zukünftige Entwicklung bis 2050 in Deutschland. Dabei werden insbesondere die sozialen, technischen, ökologischen, ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen und deren Wechselwirkungen bei der Ausarbeitung der Implementierungsszenarien hervorgehoben. Das Jahr 2050 wurde als Zeithorizont gewählt, da es dem mittelfristigen Planungshorizont einer Mehrzahl an Klimastrategien entspricht, unter optimistischen Prognosen den Zeitpunkt von Netto-Null Emissionen festlegt und eine Bewertung des CE-Beitrags zu den Zwischenzielen des Pariser Abkommens ermöglicht [IEA21, IPC22]. Die Wahl des räumlichen Fokus auf Deutschland unterliegt der Erwartung, dass die Akzeptanz von CE-Maßnahmen stark von der geografischen Nähe beeinflusst wird [BMK+15, CLL+15, PRW21]. Dennoch werden aufgrund der globalen Wirkungsweise der CE-Maßnahmen auch internationale Rahmenbedingungen, die besonders von politischen Einflussfaktoren bestimmt werden, in den Szenarien behandelt. Zielgruppe der Szenarienkommunikation sind Bürger:innen in Deutschland. Das Untersuchungsziel ist die Identifikation konkreter Argumente und Bewertungsmuster in der Auseinandersetzung der Bürger:innen mit den einzelnen Szenarien.

Schlüsselfaktor-Identifikation: Wenn das Ziel des Szenarienprozess definiert ist, sollen die Schlüsselfaktoren identifiziert werden, mit denen die verschiedenen Zukünfte des Szenariofelds hinreichend beschrieben werden können [FS11]. Hierfür werden zuerst Einflussfaktoren ermittelt. Einflussfaktoren sind beschreibbare und messbare Variablen, die veränderbare Ausprägungen besitzen [FS11].

Für die Identifikation der Einflussfaktoren wurden elf Expert:innen-Interviews mit Fachexpert:innen aus den Bereichen Climate Engineering, Verhaltensforschung und Soziologie geführt und mittels der inhaltlich-strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz und Rädiker unter Verwendung einer Kombination aus thematischen, analytischen und natürlichen Kategorien ausgewertet. Die Definition der inhaltlichen Kategorien erfolgte gemischt deduktiv-induktiv unter Anwendung der Strategie der Subsumtion. Die deduktiven Kategorien lassen sich hierbei direkt aus dem Forschungsfragen ableiten und stehen bereits vor der Befragung fest, während die induktiven Kategorien während der Analyse von Text- oder Datenmaterial aus den Materialien selbst entwickelt werden. [KR22].

Auf Basis der Datenanalyse konnten 28 Einflussfaktoren identifiziert werden, die in den Szenario-Entwicklungsprozess aufgenommen wurden. Aus den 28 Einflussfaktoren werden dann die Schlüsselfaktoren abgeleitet. Diese Reduktion wird durchgeführt, da ein Weiterarbeiten mit allen Einflussfaktoren zu sehr komplexen und unklaren Szenarien führen würde, die keine klare Analyse der Kontextwirkung zulassen [GFS98]. Um die Schlüsselfaktoren auszuwählen, die charakteristisch für die Entwicklung und Ausrichtung der Szenarien sind und dessen wesentliche Zusammenhänge repräsentieren [FS11], wurde eine Vernetzungsanalyse auf Basis intuitiver Logik und der einschlägigen Literatur durchgeführt. Die einzelnen Einflussfaktoren wurden auf Grundlage ihres Verhältnisses von Aktivsumme und Passivsumme bewertet und in aktive, dynamische und puffernde Faktoren eingeteilt [KG08]. Die aktiven und dynamischen Faktoren wurden für die weitere Ausarbeitung verwendet [Mie09]. Nach Abschluss der Analyse konnten 15 Schlüsselfaktoren identifiziert werden, die mindestens einen der zuvor ausgewählten Einflussbereiche abdecken: Polarisierung, Permakrise, Gestaltungsmöglichkeiten der Zivilbevölkerung Wissenschaftliche Klarheit, Portfolio der Technologie, Einführungsstrategien, Verlauf

des Klimawandels, Klimaschutzanstrengungen, Positionierung der deutschen Wirtschaft, Klare Narrative und Programmatik, Global Governance und Kooperation, Finanzierung, Staatliche Regulierung, Intensivität des Einsatzes der Technologie, und Missbrauch der Maßnahmen.

Schlüsselfaktor-Analyse: Der Empfehlungen der Literatur folgend wurden zwei oder drei Ausprägungen pro Schlüsselfaktor aufgestellt [GFS98, FS11]. Diese spiegeln sowohl optimistische als auch herausfordernde Entwicklungspfade wider und berücksichtigen aktuelle Forschungsergebnisse zur zukünftigen Entwicklung von DACCS-/SAI-Technologien. Tabelle 1 gibt einen beispielhaften Überblick über die definierten Ausprägungen für ausgewählte Schlüsselfaktoren.

Tabelle 1: Beispielhafte Übersicht der Schlüsselfaktoren und jeweiligen Ausprägungen

Nr.	Bezeichnung Schlüsselfaktor	Deskriptor	Ausprägung (Kurzbeschreibung)	Referenz für Ausprägungen
Soziokulturelle Schlüsselfaktoren				
S1	Polarisierung	Subjektive Wahrnehmung der Spaltung der Gesellschaft	A. Starke Polarisierung	Mor24-ol
			B. Moderate Polarisierung	
			C. Schwache Polarisierung	
Technologische Schlüsselfaktoren				
T1	Wissenschaftliche Klarheit	Verschiedene Skalen des Experimentierens: Computer Simulation, Laborexperimente, kleine, mittlere und große Feldversuche und deren Möglichkeit, Technikfolgen zu identifizieren	A. Geringe wissenschaftliche Klarheit	BLP17, S. 196
			B. Moderate wissenschaftliche Klarheit	
			C. Hohe wissenschaftliche Klarheit	
Ökologische Schlüsselfaktoren				
Ö1	Verlauf des Klimawandels	Prognostizierte Erwärmung der globalen Durchschnittstemperatur im Jahr 2100 im Vergleich zu vorindustriellen Zeiten	A. +1,5 Grad	IPC18, 17 ff.
			B. +2 Grad	
			C. +3 Grad	
Wirtschaftliche Schlüsselfaktoren				
W1	Positionierung der deutschen Industrie	Größe des Marktanteils, den die deutsche Industrie in der Produktion von DACCS-/SAI-Maßnahmen einnimmt	A. Kein Marktanteil	Expert:innen Interviews
			B. Moderate Marktanteil	
			C. Hoher Marktanteil	
Politische Schlüsselfaktoren				
P1	Klare Narrative und Programmatik	Subjektive Wahrnehmung der Zivilbevölkerung wie stark SAI-/DACCS-Maßnahmen in die politische Kommunikation eingebunden sind.	A. Starke Integration	Expert:innen Interviews

Szenario-Generierung: Zur Entwicklung von Szenarien werden konsistente Projektionsbündel aus den Ausprägungen der Schlüsselfaktoren identifiziert. Aus denen sollen im Nachgang widerspruchsfreie Szenarien erstellt werden [KG08]. Hierfür wurde eine Konsistenzanalyse

[KG08, GFS98] durchgeführt. Diese dient dazu, die Gesamtkonsistenz verschiedener Kombinationen von Projektionen mit dem Ziel zu bewerten in sich stimmige Szenarien zu identifizieren, die keine weitreichenden Widersprüche aufweisen [KG08].

Um Ermüdungseffekte bei den Rezipient:innen zu vermeiden und dem Zweck folgend, die Szenarien als Impulse für Fokusgruppen verwenden zu können, wurden zwei Szenarien pro Technologie erstellt. Die erstellten Roh-Szenarien sollten möglichst unterschiedliche Ausprägungen der einzelnen Schlüsselfaktoren abbilden, wie dem morphologischen Kasten [KG08] in Bild 1 entnommen werden kann.

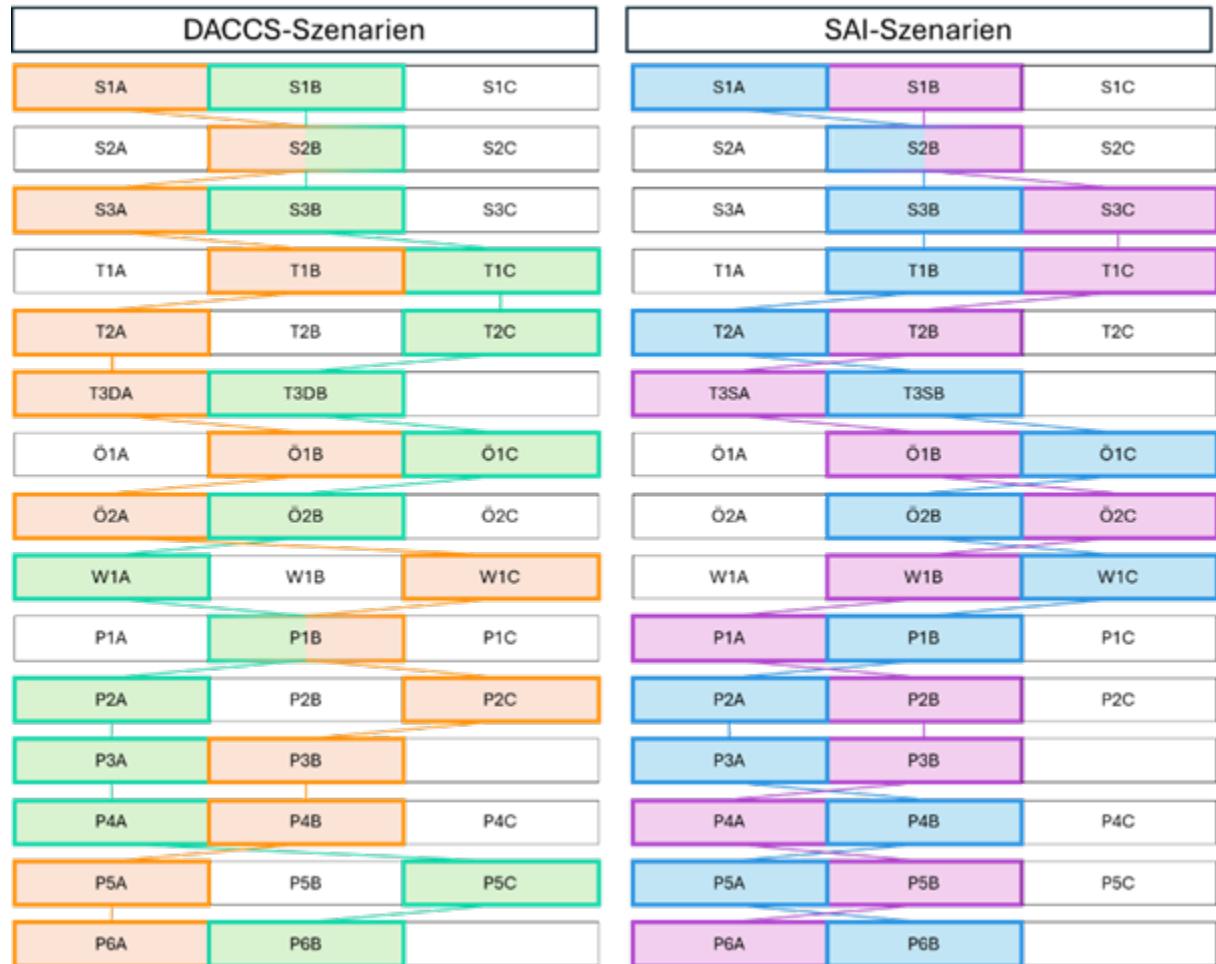


Bild 1: Übersicht der Rohszenarien in Form eines morphologischen Kastens

Zur Bildung der Rohszenarien wurde die Entwicklung möglichst ausgewogener Szenarien angestrebt, die sowohl positive als auch negative Ausprägungen berücksichtigen. Diese Balance soll während der späteren Kommunikation der Szenarien in den Fokusgruppen eine detaillierte und vielfältige Diskussion sowie die Priorisierung von Vor- und Nachteilen fördern. Dabei wurde bewusst auf die Erstellung von Best- und Worst-Case-Szenarien [KG08] verzichtet.

Als letzter Schritt galt es die Szenarien zielgruppengerecht aufzubereiten. Eine geeignete Präsentation der Szenarien soll es den Rezipierenden erleichtern, sich in die verschiedenen Zukünfte hineinzuversetzen [FS11]. Vorliegend hat man sich für die Verfassung von „Geschichten aus der Zukunft“ [FS11] entschieden. Dabei wurden je Technologie zwei Geschichten für das Jahr 2050 verfasst, die den Einsatz der SAI-/DACCS-Technologie und das systemische Umfeld

beschreiben. Gezeichnete Darstellungen unterstützten als visuelle Anker die Beschreibungen für die Zuhörenden.

4.2 Szenario-Transfer in Form von Fokusgruppen

Der Szenario-Transfer umfasst im allgemeinen die Verwendung der Szenarios für Strategieentwicklung und -bewertung, Wirkungsanalysen, Akteuranalysen und Kommunikation der Szenarien [GFS98, KG08]. Im vorliegenden Beitrag erfolgt der Szenario-Transfer durch die Kommunikation der Szenarien in den Fokusgruppen.

Es fanden acht leitfadengestützte Fokusgruppen-Sitzungen mit einer Dauer von je drei Stunden statt, die von der ersten Autorin moderiert wurden. Fokusgruppen stellen für den vorliegenden Fall eine geeignete Erhebungsmethode dar, da ein kontroverses oder vielschichtiges Forschungsproblem untersucht wird und durch die Interaktion der Teilnehmenden ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn zu erwarten ist [FM]. Insgesamt fanden acht Fokusgruppen mit 45 Teilnehmenden statt. Die Rekrutierung der Teilnehmenden erfolgte themenblind, um vorbereitete Antworten zu vermeiden und spontane Reaktionen in der Diskussion zu ermöglichen [Mie09]. Die Auswahl der Teilnehmenden basierte auf den soziodemografischen Merkmalen Alter, Bildungsniveau und Erwerbsklasse. Die Fokusgruppen wurden heterogen zusammengesetzt, um Perspektivenvielfalt in der Diskussion zu fördern. Jede der acht Fokusgruppe wurde mit der Erörterung des Einsatzes einer der beiden CE-Maßnahmen betraut (vier Fokusgruppen DACCS-Maßnahmen, vier Fokusgruppen SAI-Maßnahmen). Die Fokusgruppen wurden alle in Karlsruhe, Baden-Württemberg durchgeführt.

In den Fokusgruppendiskussionen wurden verschiedene Stimuli eingesetzt, um den Gesprächsverlauf zu strukturieren und die Teilnehmenden zu aktivieren [FM]. Der erste Stimulus bestand in der Vorstellung der grundlegenden Funktionsweise und der Vor- und Nachteile einer der beiden CE-Maßnahmen. Die Bekanntheit der Technologie wurde mittels Handzeichen abgefragt. Nach der Vorstellung der Technologie wurden die Teilnehmenden aufgefordert, ihre Gedanken und Gefühle zur Technologie zu diskutieren. Die Diskussion schloss mit der Frage: „Wie akzeptabel oder inakzeptabel finden Sie den zukünftigen Einsatz dieser Technologie?“, worauf sich die Teilnehmenden auf einer 5-stufigen Likert-Skala einordnen und ihre Bewertung begründen sollten.

Anschließend las die Moderatorin die erste Zukunftsgeschichte vor. In der anschließenden Diskussion tauschten die Teilnehmenden ihre Einschätzung zum Einsatz der CE-Maßnahme im vorgestellten Zukunftsszenario aus. Abschließend wurde die Akzeptanz auf einer Skala abgefragt: „Wie akzeptabel oder inakzeptabel finden Sie den Einsatz der Technologie in dieser Zukunft, unter diesen Voraussetzungen?“ Dabei konnten sich die Teilnehmenden erneut positionieren und ihre Bewertung begründen. Die Vorstellung des zweiten CE-Szenario folgte demselben Ablauf. Um die Szenarien gegenüberzustellen und zu vergleichen, führten die Teilnehmenden unter Leitung der Moderatorin eine Metadiskussion durch. Zum Abschluss der Metadiskussion wurde die zu Beginn gestellte Skalenfrage wiederholt, um zu messen, ob sich die Akzeptanz der Technologie im Verlauf der Diskussion verändert hat.

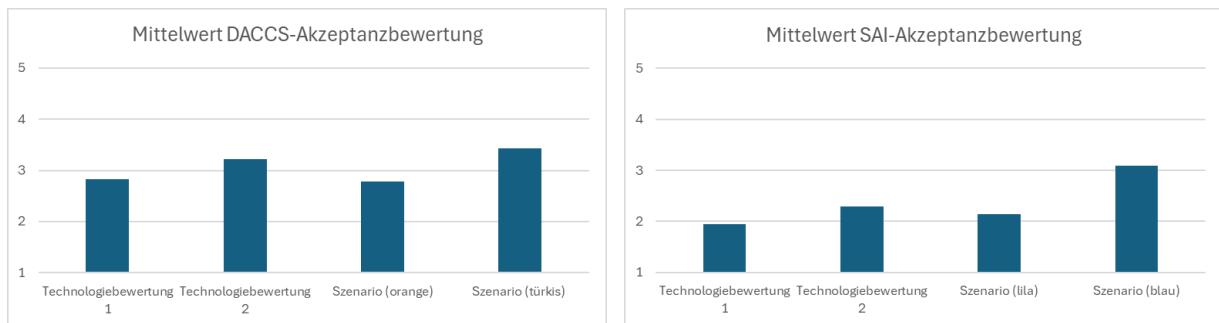
Die Transkription der Daten erfolgte softwaregestützt und wurde anschließend mit der Software MAXQDA ausgewertet. Die Datenanalyse wurde unter Anwendung der inhaltlich strukturierten qualitativen Inhaltsanalyse mit induktiv-deduktiv Kategorienbildung nach Kuckartz und Rädiker (2019) vorgenommen [RK19].

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, wie sich der Einsatz von Szenarien auf die Technologieakzeptanz und deren Bewertung im Verlauf der Diskussion in der Fokusgruppen auswirkt. Das Erkenntnisinteresse besteht in der Evaluation der Methode, um Empfehlungen für künftige Forschungsansätze abzuleiten.

Zur Einordnung der nachfolgenden Ergebnisse sei erwähnt, dass etwa die Hälfte der Teilnehmenden (23 von 45 Teilnehmenden) bis zu dem Zeitpunkt der Fokusgruppe noch nie von der vorgestellten CE-Technologie gehört hatten und diese nicht kannten.

Die Auswertung der Skalenfragen nach der Diskussion jedes Stimulus zeigen, dass der Einsatz von Szenarien Auswirkungen auf die Akzeptanzbewertung der Technologien hat. Die SAI-Maßnahme wurden im Durchschnitt als weniger akzeptabel eingestuft als die DACCS-Technologie. Beide Technologien zeigten große Bewertungsveränderungen je nach dem in welchem Szenario die Technologie eingebettet wurde (siehe Bild 2).



*Bild 2: Überblick Skalenbewertungen der Technologien und Szenarien
(Skala: 1=nicht akzeptabel bis 5=sehr akzeptabel)*

Die abgefragte Technologiebewertung ohne Szenarien war am Ende der Fokusgruppen (Technologiebewertung 2) positiver im Vergleich zur Anfangsbewertung (Technologiebewertung 1). In der Diskussion der Bewertung zeigt sich, dass sich hierbei vor allem der kognitive Prozess der Entscheidungsfindung verändert hat, wie es eine Teilnehmerin treffend formulierte:

„Mir ist aufgefallen, [...] bei der ersten Frage, da ging es vor allem primär um die Technologie an sich, also Risiken und Nebenwirkungen und Vorteile. [...] Da war gar nicht die Perspektive, was bedeutet das für die Gesellschaft, was bedeutet das für die globale Staatengemeinschaft. Diese ganzen Fragen, [...] die hier diskutiert wurden, die waren mir noch gar nicht so bewusst. Und die sind mir jetzt bewusst geworden, in den beiden Szenarien.“

Die Akzeptanzentscheidung wurde dieser Aussage folgend auf der Basis weiterer Einflussfaktoren getroffen, die mehr mit der systemischen Wirkung verbunden waren. Die Verwendung der Szenarien kann somit eine Sensibilisierung für Kontextualisierungseffekte fördern und auf akzeptanzbestimmende Rahmenbedingungen aufmerksam machen, die den Teilnehmenden zu Beginn der Diskussion bei der objektiven Technologiedarstellung nicht bewusst waren.

Die Diskussion über die Szenarien unterstützten die Formulierung von Konditionen für die Akzeptanz der Technologie. Eine Beteiligte bezeichnete die Abwägung dieser Konditionen als „wenn-dann-Antworten“:

„Weil es [...] eben darum geht, welche Rahmenbedingungen werden zusätzlich noch geschaffen, unter welchen Umständen wird es dann eingesetzt.“

Zudem konnten weitere akzeptanzbeeinflussenden Dimensionen benannt werden, die in den Szenarien selbst nicht behandelt wurden, aber deren Fehlen bei einer Diskussion des systemischen Kontextes von den Teilnehmenden bemerkt wurde. So wurde bspw. angemerkt, dass Informationen zu Migrationsströmungen oder der wirtschaftlichen Lage anderer Industrien in Deutschland Einfluss auf die Akzeptanz der Maßnahmen haben könnten.

Gleichzeitig zeigte sich aber auch, dass die beiden vorgestellten Zukünfte mögliche Handlungsspielräume und Alternativen ausschlossen und der dadurch künstlich gestaltete Determinismus einer bestehenden Zukunft auch zu Frustration in der Diskussion führen kann. So bemerkte eine Teilnehmerin bei der Frage nach ihrer Akzeptanzeinschätzung:

„Also ich tauche da auf und lebe jetzt in dieser Situation und jetzt ist meine Meinung gefragt, wie akzeptabel. Aber es gibt ja nichts zu entscheiden, also es ist ja schon so.“

Die Sprecherin beschreibt sich selbst als plötzlich in eine Situation versetzt, ohne Einfluss auf deren Entstehung gehabt zu haben. Hier wird einerseits eine fehlende Zeitdimension deutlich sowie eine Diskrepanz zwischen Meinungsabfrage und realer Wirkmächtigkeit angedeutet. Zudem lässt sich eine Resignation bemerken, die eine Kritik an der Scheinpartizipation in einer alternativlos wahrgenommenen Realität vermuten lässt.

Gleichzeitig wurde das Szenario aber auch als Ausgangspunkt für eine kritische Auseinandersetzung mit technologischen Entwicklungen und ihren gesellschaftlichen Folgen aufgefasst. So sagte ein Teilnehmer:

„Aber wenn wir jetzt in der Zukunft sind und das Szenario ja bewirkt, was es bewirkt in diesem Fall, und [...] alle negativen Aspekte auf dem Tisch liegen, [...] das finde ich an der Stelle dann wirklich so inakzeptabel, dann hätte es am besten diese Technologie gar nicht erst gegeben.“

Im Gegensatz zu der zuvor geäußerten Resignation, wird hierbei ein kritisch-normativer Umgang mit dem Szenario deutlich, der die Handlungsoptionen und Bewertungsmöglichkeit auf die Gegenwart bezieht. In einem weiteren Beitrag, der sich an den normativen Umgang mit Szenarien anschloss, lässt sich eine positive Auswirkung der aufgezeigten Gestaltungsmöglichkeiten auf die Akzeptanzbewertung der Technologie feststellen:

„Ich bin eigentlich auch immer noch bei teils-teils, weil man die Frage einfach differenzierter beantworten muss. Aber da wir hier auch gerade ein paar Stunden miteinander gesprochen haben, sage ich es mal unter den Gesichtspunkten, die wir hier alle besprochen haben, die diese Technologie akzeptabler machen, [...], finde ich es jetzt schon akzeptabler als am Anfang, wenn man dann darüber mal gesprochen hat. [...] Ich habe nur so ein bisschen Optimismus, dass wenn wir sie einsetzen, dass wir es dann unter Rahmenbedingungen machen, mit der wir das auch sinnvoll kombinieren“

Ein weiterer Reflexionsaspekt, der durch die Arbeit mit den Szenarien sichtbar wurde, war das Erkennen von systemischen Konflikten, die durch die zwei Szenarien kontrastiert wurden. Dies macht ein Gespräch zwischen zwei Teilnehmenden zu der Dimension der Gestaltungsmöglichkeiten der Zivilbevölkerung deutlich, die in den beiden vorgestellten Szenarien unterschiedlich ausgeprägt war:

„Aber kann man überhaupt die Bevölkerung an diesen Entscheidungen beteiligen? [K]ann eine Masse überhaupt solche Innovationen nachvollziehen und verstehen? Und ist es am Ende [...] einfach nur eine Gefühlssache. Also weil mein erstes Gefühl war, ich misstraue dem ganzen Ding, irgendwie ist das nicht logisch für mich. Aber ich habe keine Fakten dahinter. Und für mich kommt das jetzt wieder zurück. Vielleicht hat man hier irgendwie trotzdem ein Vertrauen.“

Woraufhin ein anderer Teilnehmer antwortete:

„Ich finde das arbeitet richtig schön solche Konflikte raus, die zwei Szenarien.“

Zivilgesellschaftliche Beteiligung wird hier zwar als wünschenswert, aber möglicherweise illusorisch gesehen, solange technische Komplexität dominiert. Hierbei wird ein Spannungsfeld offen gelegt und gleichzeitig die zuvor geäußerte Bewertung der Technologie überdacht, die auf einem Gefühl von Misstrauen unabhängig von rationalem Wissen basierte. Wie von der zweiten Person aufgezeigt, können Szenarien helfen solche Konflikte sichtbar zu machen.

Eine weitere Erkenntnis zur Wirkung der Szenarien im verwendeten Studiendesign ist der produktive Einsatz von Analogien, um komplexe Prozesse innerhalb der Szenarien verständlich zu machen und kritisch einzuordnen. Die Teilnehmenden zogen hierbei die Corona-Pandemie als Analogie heran, um politische und gesellschaftliche Dynamiken innerhalb der Gruppen anschlussfähig zu thematisieren. So diente die Pandemie im Gespräch als Beispiel für gesellschaftliche Polarisierung und wurde verwendet, um aufzuzeigen wie die öffentliche Debatte durch die Tabuisierung bestimmter Themen eingeschränkt wurde. Gleichzeitig wurde die Corona-Zeit von den Teilnehmenden genutzt, um die Wirkmechanismen von Emergency-Framings zu diskutieren. Diese können zwar Entscheidungsprozesse beschleunigen, führen aber zugleich zu einer Entdemokratisierung des Prozesses, in dem deliberative Verfahren unterlaufen werden. Solche Verknüpfungen ermöglichen den Teilnehmenden, vorgestellte Zukunftsbilder mit vertrauten Krisenerfahrungen zu verknüpfen und gleichzeitig emotionale Resonanzräume zu öffnen.

6 Diskussion

Die Unbekanntheit von CE-Technologien macht sie in der öffentlichen Wahrnehmung besonders anfällig für sogenannte Framing-Effekte, bei denen die Art der Informationsvermittlung erheblich die Meinungsbildung beeinflussen kann [KKO+21, CFW+20]. Besonders Szenarien, die eine deterministische Zukunft entwerfen, in der ein Klimanotfall bereits eingetreten ist, können durch ein sogenanntes „Climate Emergency“-Framing die Akzeptanz von Maßnahmen beeinflussen. In solchen Darstellungen erscheint die Technologie als unausweichliche Reaktion auf eine bevorstehende Katastrophe und wird damit als Ultima Ratio legitimiert [MS13, MKP+19]. Dieser Effekt zeigt sich in bisherigen Studien verstärkt bei der Vorstellung von RM-Maßnahmen, die häufig als Notfalllösung dargestellt werden [BCV16, WHA+17]. Solche Szenarien sollten daher kritisch reflektiert und methodisch sensibel eingesetzt werden. In der vorliegenden Untersuchung konnte durch die Gegenüberstellung zweier Szenarien mit unterschiedlichem Einführungszeitpunkt der Maßnahmen und Klimawandelverlauf dieser Framing-Effekt teilweise abgeschwächt werden.

Charakteristisch für die Akzeptanzforschung von CE-Technologien ist das Konzept der „Reluctant Acceptance“ [CY18, S. 124]. Diese Form der Zustimmung beschreibt eine zögerliche, oft widerwillige Akzeptanz als „Notlösung“ oder „Backup-Strategie“ angesichts einer als alternativlos empfundenen Krise [AF15]. Eine enthusiastische Zustimmung bleibt dabei aus. Vielmehr handelt es sich um ein Dulden der Maßnahmen [CSP20]. Eng damit verbunden ist das Konzept der „Conditional Acceptance“: Die Zustimmung zu CE-Maßnahmen ist dabei stark an bestimmte gesellschaftliche, politische oder wirtschaftliche Bedingungen geknüpft [MS13, CY18]. Diese Bedingungen beziehen sich weniger auf die Technologie selbst als auf ihre systemische Einbettung. Je nach Rahmung der Szenarien können dadurch unterschiedliche Formen der Akzeptanz debattiert werden. Die Akzeptanzforschung muss diese feinen Abstufungen differenziert sichtbar machen. Die Arbeit mit Szenarien kann dabei helfen, Konditionen und Gestaltungsbedingungen zu identifizieren, die Akzeptanz fördern oder aber lediglich eine passive Duldung erzeugen.

Szenarien wirken nicht allein durch ihren fiktionalen Charakter, sondern auch durch ihre Fähigkeit, kollektive Erinnerungen zu aktivieren und Deutungsmuster zu strukturieren. In diesem Zusammenhang treten häufig metaphorische Vergleiche und historische Analogien auf. Diese Vergleiche erfüllen eine sinnstiftende Funktion und werden gezielt von den Teilnehmenden als rhetorische Mittel zur Meinungsbildung und Positionierung eingesetzt [BLP17]. Darüber hinaus helfen diese, neue oder komplexe Risikotechnologien mit bekannten gesellschaftlichen Erfahrungen zu verknüpfen und in der Gruppe einzuordnen [CPS22]. Die Einbettung der Technologien in unterschiedliche Zukunftsszenarien ermöglichte es den Teilnehmenden, neue, bislang nicht mit CE verbundene Analogien zu entwickeln. Diese Analogien eröffnen einen Zugang zu den gesellschaftlichen Aushandlungsprozessen, in die technologische Innovationen eingebettet sind. Aus einer gestaltungsorientierten Perspektive ist es daher zentral, frühzeitig negative Zuschreibungen zu erkennen, bevor diese durch wiederholte diskursive Muster verfestigt und naturalisiert werden [Höi11]. So kann die Arbeit mit Szenarien einen methodischen Ansatz bieten, um geeignete Kommunikationsstrategien für neue Technologien zu entwickeln und deren Einbettung in den kollektiven Diskurs zu lenken.

Darüber hinaus zeigt die Untersuchung, dass Szenarien keine einheitliche Bewertungsbasis erzeugen, da sie stets deutungsoffen sind. Forschungsansätze, die Zukunftsszenarien nutzen, sollten daher Entscheidungsspielräume offenhalten, um ein Gefühl von Wirkmächtigkeit zu stärken und den Teilnehmenden nicht das Gefühl von Scheinpartizipation oder Meinungsirrelevanz vermitteln. Eine effektive Szenarienarbeit in der Akzeptanzforschung erfordert daher klare Fragestellungen, offene Entscheidungsmöglichkeiten sowie eine Metaebene, auf der Teilnehmende ihre Rolle im Diskurs reflektieren können.

Resümierend lässt sich festhalten, dass die eingesetzten Szenarien in den Fokusgruppen eine Vielzahl an Funktionen erfüllten und maßgeblich zur Gestaltung der Diskussionen beitrugen. Sie wurden als Reflexionsmittel genutzt, das den Teilnehmenden half, Kontextfaktoren im Kontrast zu rein technologischen Vor- und Nachteilen zu gewichten. Dies förderte die Formulierung konkreter Akzeptanzkonditionen und die Identifikation bislang unbehandelter, aber relevanter Rahmenbedingungen. Auch die Erkennung von Spannungsfeldern innerhalb der Szenarien regte die Priorisierung einzelner Dimensionen an. In ihrer Funktion als Gestaltungsrahmen wurden sie jedoch auch kritisch diskutiert: Der vorgegebene Determinismus und die begrenzte Möglichkeit zur eigenen Partizipation führten bei einigen Teilnehmenden zu Frustration. Nicht zuletzt zeigte die Analyse der Diskussionen, dass Szenarien auch zur Wissensgenerierung beitragen. Es wurden neue Analogien, sowie Argumentationslinien entwickelt, die in der Diskussion über das Akzeptanzobjekt nicht aufgetreten sind. Diese Erkenntnisse wurden erst durch die Kontextualisierung innerhalb der Szenarien sichtbar und erweiterten die Diskussion um gesellschaftlich relevante Perspektiven.

7 Fazit

Resümierend liefert die vorliegende Forschung wertvolle Einblicke in den komplexen Prozess der Akzeptanzbildung gegenüber emergenten Technologien wie CE. Ein zentrales Ergebnis der vorliegenden Untersuchung ist der signifikante Einfluss der Szenarienmethode auf die qualitative Bewertung von CE-Maßnahmen. Damit stützen die Ergebnisse die grundlegende Annahme, dass die soziopolitische Kontextualisierung maßgeblich zur Wahrnehmung und Akzeptanz technologischer Innovationen beiträgt.

Limitationen ergeben sich aus der begrenzten Teilnehmendenanzahl der Fokusgruppen. Zukünftige Studien sollten auch CE-freie Zukunftsentwürfe einbeziehen, um ein breiteres Spektrum möglicher Entwicklungen abzubilden und deterministischen Effekten entgegenzuwirken wie bspw. den Eindruck einer scheinbaren Alternativlosigkeit.

Obwohl sich die Untersuchung auf CE-Maßnahmen konzentriert, lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse auch auf die Akzeptanzforschung anderer emergenter Technologien übertragen. Die methodische Kombination von qualitativen Fokusgruppen mit der Szenarientechnik stellt einen innovativen Beitrag zur Weiterentwicklung partizipativer Akzeptanzforschung dar. Zukünftige Forschung sollte unterschiedliche Varianten der Szenariengestaltung systematisch testen, um ein vertiefendes Verständnis über soziale Wahrnehmungsprozesse und deren Einfluss auf die Technologieakzeptanz zu gewinnen.

Literatur

[AF15] AMELUNG, D.; FUNKE, J.: Laypeople's Risky Decisions in the Climate Change Context: Climate Engineering as a Risk-Defusing Strategy? *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, (21)2, 2015, S. 533–559

[BCV16] BELLAMY, R.; CHILVERS, J.; VAUGHAN, N. E.: Deliberative Mapping of options for tackling climate change: Citizens and specialists 'open up' appraisal of geoengineering. *Public understanding of science* (Bristol, England), (25)3, 2016, S. 269–286

[BEL22] BELLAMY, R.: Mapping public appraisals of carbon dioxide removal. *Global Environmental Change*, (76), 2022

[BJM+21] BROECKS, K.; JACK, C.; MORS, E. TER; BOOMSMA, C.; SHACKLEY, S.: How do people perceive carbon capture and storage for industrial processes? Examining factors underlying public opinion in the Netherlands and the United Kingdom. *Energy Research & Social Science*, (81), 2021

[BLP17] BELLAMY, R.; LEZAUN, J.; PALMER, J.: Public perceptions of geoengineering research governance: An experimental deliberative approach. *Global Environmental Change*, (45), 2017, S. 194–202

[BLP19] BELLAMY, R.; LEZAUN, J.; PALMER, P.: Perceptions of bioenergy with carbon capture and storage in different policy scenarios. *Nature communications*, (10)1, 2019

[BMK+15] BRUNSTING, S.; MASTOP, J.; KAISER, M.; ZIMMER, R.; SHACKLEY, S.; MABON, L.; HOWELL, R.: CCS Acceptability: Social Site Characterization and Advancing Awareness at Prospective Storage Sites in Poland and Scotland. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles*, (70)4, 2015, S. 767–784

[BMP+18] BRAUN, C.; MERK, C.; PÖNITZSCH, G.; REHDANZ, K.; SCHMIDT, U.: Public perception of climate engineering and carbon capture and storage in Germany: survey evidence. *Climate Policy*, (18)4, 2018, S. 471–484

[BSW19] BEYER, D.; SCHIEK, M.; WEISSENBERGER-EIBL, M. A.: Der Weg in die Zukunft – Warum Deutschland eine Zukunftsvision braucht. In: Weissenberger-Eibl, M. A. (Hrsg.): *Zukunftsvision Deutschland – Innovation für Fortschritt und Wohlstand*. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2019, S. 3–13

[CFW+20] CARLISLE, D. P.; FEETHAM, P. M.; WRIGHT, M. J.; TEAGLE, D. A. H.: The public remain uninformed and wary of climate engineering. *Climatic Change*, (160)2, 2020, S. 303–322

[CLL+15] CHEN, Z.-A.; LI, Q.; LIU, L.-C.; ZHANG, X.; KUANG, L.; JIA, L.; LIU, G.: A large national survey of public perceptions of CCS technology in China. *Applied Energy*, (158), 2015, S. 366–377

[CPS22] COX, E.; PIDGEON, N.; SPENCE, E.: But They Told Us It Was Safe! *Carbon Dioxide Removal, Fracking, and Ripple Effects in Risk Perceptions*. Risk analysis an official publication of the Society for Risk Analysis, (42)7, 2022, S. 1472–1487

[CR14] CAVIEZEL, C.; REVERMANN, C.: Climate Engineering – Endbericht zum TA-Projekt "Geoengineering". Arbeitsbericht, Berlin, 2014

[CRU06] CRUTZEN, P. J.: Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? *Climatic Change*, (77)3-4, 2006, S. 211–219

[CSP20] COX, E.; SPENCE, E.; PIDGEON, N.: Public perceptions of carbon dioxide removal in the United States and the United Kingdom. *Nature Climate Change*, (10)8, 2020, S. 744–749

[CSP22] COX, E.; SPENCE, E.; PIDGEON, N.: Deliberating enhanced weathering: public frames, iconic ecosystems, and the governance of carbon removal at scale. *Public understanding of science* (Bristol, England), 31, 2022

[CY18] CARR, W. A.; YUNG, L.: Perceptions of climate engineering in the South Pacific, Sub-Saharan Africa, and North American Arctic. *Climatic Change*, (147)1-2, 2018, S. 119–132

[DÖR23] DÖRING, N.: *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. 6. Auflage, Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, 2023

[FM] FITZPATRICK, J.; MAYER, S. J.: Fokusgruppen. In: Borucki, I.; Kleinen-von Königslöw, K.; Marschall, S.; Zerback, T. (Hrsg.): Handbuch Politische Kommunikation. Springer VS, Wiesbaden, 2022, S. 703–711

[FS11] FINK, A.; SIEBE, A.: Handbuch Zukunftsmanagement – Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung. 2. Auflage, Management, Campus-Verl., Frankfurt am Main, 2011

[FSS02] FINK, A.; SCHLAKE, O.; SIEBE, A.: Erfolg durch Szenario-Management – Prinzip und Werkzeuge der strategischen Vorausschau. 2. Auflage, Campus-Verl., Frankfurt/Main, 2002

[GFS98] GAUSEMEIER, J.; FINK, A.; SCHLAKE, O.: Scenario Management. Technological Forecasting and Social Change, (59)2, 1998, S. 111–130

[HBF+02] HÜSING, B.; BÜHRLEN, B.; FRIEDEWALD, M.; KIMPELER, S.; MENRAD, K.; WENGEL, J.; ZIMMER, R.; ZOCHE, P.; HÜSING, B.; BIERHALS, R.; BÜHRLEN, B.; FRIEDEWALD, M.; KIMPELER, S.; MENRAD, K.; WENGEL, J.; ZIMMER, R.; ZOCHE, P.: Technikakzeptanz und Nachfragemuster als Standortvorteil. Fraunhofer-Gesellschaft, Karlsruhe, 2002

[HMS12] HUIJTS, N.; MOLIN, E.; STEG, L.: Psychological factors influencing sustainable energy technology acceptance: A review-based comprehensive framework. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (16)1, 2012, S. 525–531

[HÖI11] HÖIJER, B.: Social Representations Theory. Nordicom Review, (32)2, 2011, S. 3–16

[IEA21] IEA: Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector, 2021

[IPC18] IPCC: Summary for Policymakers – In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge University Press, 2018

[IPC22] IPCC: Climate change 2022 – Mitigation of climate change. IPCC, Geneva, 2022

[KG08] KOSOW, H.; GÄBNER, R.: Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse – Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien. WerkstattBericht / IZT, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Band 103, IZT, Berlin, 2008

[KK17] KARIMI, F.; KOMENDANTOVA, N.: Understanding experts' views and risk perceptions on carbon capture and storage in three European countries. GeoJournal, (82)1, 2017, S. 185–200

[KKO+21] KLAUS; KLAUS, G.; OSWALD, L.; ERNST, A.; MERK, C.: Effects of opinion statements on laypeople's acceptance of a climate engineering technology. Comparing the source credibility of researchers, politicians and a citizens' jury. Journal of Science Communication, (20)01, 2021, A03

[KR22] KUCKARTZ, U.; RÄDIKER, S.: Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung – Grundlagentexte Methoden. 5. Auflage, Grundlagentexte Methoden, Beltz Juventa, Weinheim, 2022

[LBS22] LOW, S.; BAUM, C. M.; SOVACOOL, B. K.: Taking it outside: Exploring social opposition to 21 early-stage experiments in radical climate interventions. Energy Research & Social Science, (90), 2022, S. 102594

[MIE09] MIETZNER, D.: Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen – Methodenevaluation und neue Ansätze. Zugl.: Potsdam, Univ., Diss., 2009. Gabler Research Innovation und Technologie im modernen Management, Gabler, Wiesbaden, 2009

[MKP+19] MERK, C.; KLAUS, G.; POHLERS, J.; ERNST, A.; OTT, K.; REHDANZ, K.: Public perceptions of climate engineering: Laypersons' acceptance at different levels of knowledge and intensities of deliberation. GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society, (28)4, 2019, S. 348–355

[MOR24-OL] MORE IN COMMON: Neue Forschung: Die Stimmung in Deutschland vor der Europawahl. Unter: <https://www.moreincommon.de/europawahl/>, 6. Dezember 2024

[MP16] MERK, C.; PÖNITZSCH, G.: The role of affect in attitude formation toward new technologies: The case of stratospheric aerosol injection. Kiel Working Paper, No. 2024, 2016

[MPK+15] MERK, C.; PÖNITZSCH, G.; KNIEBES, C.; REHDANZ, K.; SCHMIDT, U.: Exploring public perceptions of stratospheric sulfate injection. *Climatic Change*, (130)2, 2015, S. 299–312

[MS13] MACNAGHTEN, P.; SZERSZYNSKI, B.: Living The Global Social Experiment: An Analysis Of Public Discourse On Solar Radiation Management And Its Implications For Governance. *Global Environmental Change*, (23)2, 2013, S. 465–474

[PRW21] PIANTA, S.; RINSCHEID, A.; WEBER, E. U.: Carbon Capture and Storage in the United States: Perceptions, preferences, and lessons for policy. *Energy Policy*, (151), 2021, S. 112149

[RK19] RÄDIKER, S.; KUCKARTZ, U.: Analyse qualitativer Daten mit MAXQDA – Text, Audio und Video. Springer eBook Collection, Springer VS, Wiesbaden, 2019

[SK13] SCHÄFER, M.; KEPPLER, D.: Modelle der technikorientierten Akzeptanzforschung – Überblick und Reflexion am Beispiel eines Forschungsprojekts zur Implementierung innovativer technischer Energie-Effizienzmaßnahmen. *Discussion paper*. Berlin, 2013

[SLS+05] SAUER, A.; LUZ, F.; SUDA, M.; WEILAND, U.: Steigerung der Akzeptanz von FFH-Gebieten, 2005

[SLS+15] SCHÄFER, S.; LAWRENCE, M.; STELZER, H.; BORN, W.; LOW, S.; AAHEIM, A.; ADRIÁZOLA, P.; BETZ, G.; BOUCHER: The European Transdisciplinary Assessment of Climate Engineering (EuTRACE): – Removing Greenhouse Gases from the Atmosphere and Reflecting Sunlight away from Earth., 2015

[SPI10-OL] SPICE: SPICE – Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering. Unter: <http://www.spice.ac.uk/about-us/aims-and-background/>, 10. März 2024

[THE09] THE ROYAL SOCIETY: Geoengineering the climate – Science, governance and uncertainty. London, 2009

[WEI17] WEISSENBERGER-EIBL, M. A.: Innovationsforschung – ein systemischer Ansatz – Merkmale, Methoden und Herausforderungen. *Denkströme*, 17, 2017, S. 33–56

[WHA+17] WIBECK, V.; HANSSON, A.; ANSHELM, J.; ASAYAMA, S.; DILLING, L.; FEETHAM, P. M.; HAUSER, R.; ISHII, A.; SUGIYAMA, M.: Making sense of climate engineering: a focus group study of lay publics in four countries. *Climatic Change*, (145)1-2, 2017, S. 1–14

Autoren

Marina Brunner, M. Sc., ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin am Lehrstuhl für Innovations- und TechnologieManagement (iTM) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und Gastwissenschaftlerin am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Sie schreibt derzeit ihre Promotion mit Forschungsschwerpunkt Climate Engineering, gesellschaftliche Früherkennung & soziale Akzeptanz.

Univ.-Prof. Dr. Marion A. Weissenberger-Eibl; Institutsleiterin Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; Lehrstuhlinhaberin Innovations- und TechnologieManagement iTM am Institut für Entrepreneurship, Technologie-Management und Innovation des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Univ.-Prof. Dr. Marion A. Weissenberger-Eibl leitet das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI in Karlsruhe und ist Inhaberin des Lehrstuhls für Innovations- und TechnologieManagement (iTM) am Institut für Entrepreneurship, Technologie-Management und Innovation am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Sie arbeitet zu Entstehungsbedingungen von Innovationen und deren Auswirkungen. Wiederholt wurde sie als eine der 100 einflussreichsten Frauen der deutschen Wirtschaft ausgezeichnet. Die studierte Bekleidungsingenieurin sowie Betriebswirtschaftlerin promovierte und habilitierte sich an der Technischen Universität München. In Wirtschaft und Politik ist sie

eine geschätzte Expertin in den Fokusthemen Innovation, Zukunftsforschung, Digitalisierung und Nachhaltigkeit.

Wolfgang Müller-Petralla verbindet seit über drei Jahrzehnten wissenschaftliche Expertise im Umweltmanagement, Zukunftsforschung und Mustererkennung in Daten, mit hochrangiger Industrie- und Lehrtätigkeit. Er prägte als Initiator und Leiter der Abteilung Zukunftsforschung und Trendtransfer der Volkswagen AG die strategische Vorausschau, sowie die Forschungsausrichtung in den Feldern bahnbrechende Technologien, Mobilität, Mustererkennung und Nachhaltigkeit. Müller -Petralla wirkt national und international als Jury- und Beirats Mitglied. Er war u.a. 2011/2012 Experte des Zukunftsdialogs der Bundeskanzlerin, 2011-2019 Kurator am Fraunhofer-Institut für System,- und Innovationsforschung (ISI) und ist Mitglied des digital-Rat.niedersachsen sowie des wissenschaftlichen Beirats des Instituts für Innovation und Technik (iiT) in der VDI/VDE-IT.

From Uncertainty to Direction: Delphi-Methodik und Szenario-Planung als Innovationskompass im Zeitalter von KI und Quantum-computing

Anna-Vanadis Faix¹, Heiko von der Gracht², Stefanie Kisgen¹

¹ Alma Mater Europaea – ECH, afaix@alma-mater-eu.eu, kisgen@alma-mater-eu.eu

² Universität für Weiterbildung Krems, heiko.von-der-gracht@donau-uni.ac.at

Zusammenfassung

Wir leben in einer VUCA-Welt und Märkte verändern sich zunehmend durch technologische Disruptionen, geopolitische Umbrüche und sich wandelnde Kundenbedürfnisse. Die Halbwertszeit von Wissen verkürzt sich und langfristige Planung der Zukunft wird immer komplexer. Organisationen müssen nicht nur agil und flexibel agieren, um auf stets verändernde Rahmenbedingungen zu reagieren, sondern sind auch einem enormen Innovationsdruck ausgesetzt: Wer nicht innoviert ist nicht wettbewerbsfähig. Technologischer Fortschritt durch KI und die zunehmende Effizienz des Quantencomputers (sowie deren intelligente Verknüpfung) werden diese Effekte weiter verstärken und schaffen potenzielle Meta-Innovation.

Unter diesem wachsenden Innovationsdruck und der steigenden Komplexität künftiger Märkte, sind Organisationen gezwungen ihre Ziele neu auszurichten – von der Identifikation neuer Trends bis hin zur Gestaltung neuer, resilenter Geschäftsmodelle. Trotz dynamischem Umfeld greifen Organisationen meist auf klassische Zieldefinierung und Innovationsstrategien zurück: Sie definieren sequentielle Ablaufphasen, meist ausgerichtet an Forecasting, Extrapolation oder der eigenen Intuition über zukünftige Entwicklungen.

Vielmehr muss jedoch entlang der Methodik der Zukunftsforschung ein holistisches Trendmanagement, sowie Zukunftskompetenzen in einer Organisation entwickelt und umgesetzt werden und gezielt auf die agile und komplexe Umgebung gerichtet sein. Dies ist notwendig um zielgerichtet (v.a. radikale und disruptive) wertschöpfende Innovation hervorzubringen und in die Zukunft zu steuern. Der Beitrag vertritt die Hauptthese vertreten, dass (in einer ersten Annäherung) die Methoden der Szenario-Planung und Delphi-Methodik vor dem Hintergrund des immer schnelleren Marktes und zunehmenden Meta-Innovationspotenzialen (KI, QC) als Kompass für Innovationsmanagement und -streuung fungieren kann und dahingehend immer zentraler wird.

Schlüsselworte

Zukunftsmanagement, strategisches Innovationsmanagement, Delphi-Methodik, Szenario-Planung, Meta-Innovationen

From Uncertainty to Direction: Delphi-methodology and scenario planning as an innovation compass in the age of AI and quantum computing

Abstract

We live in a VUCA world, and markets are increasingly changing due to technological disruptions, geopolitical upheavals, and changing customer needs. The half-life of knowledge is shortening, and long-term planning for the future is becoming increasingly complex. Organizations must not only act agilely and flexibly in order to respond to constantly changing conditions, but are also under enormous pressure to innovate: those who do not innovate are not competitive. Technological advances through AI and the increasing efficiency of quantum computers (and their intelligent interconnection) will further amplify these effects and create potential meta-innovation.

Under this growing pressure to innovate and the increasing complexity of future markets, organizations are forced to realign their goals – from identifying new trends to designing new, resilient business models. Despite the dynamic environment, organizations usually fall back on classic goal definition and innovation strategies: They define sequential process phases, usually based on forecasting, extrapolation, or their own intuition about future developments.

Instead, however, holistic trend management and future skills must be developed and implemented in an organization in line with futurology methodology and specifically geared toward the agile and complex environment. This is necessary in order to generate targeted (especially radical and disruptive) value-adding innovation and steer it into the future. The article argues that (as a first approximation) the combination of scenario planning and the Delphi methodology can serve as a compass for innovation management and diffusion against the backdrop of an increasingly fast-paced market and growing meta-innovation potential (AI, QC), and will become increasingly central in this regard.

Keywords

Future management, strategic innovation management, Delphi methodology, scenario planning, meta-innovations

1 Einleitung

Die zunehmende Volatilität globaler Märkte, gepaart mit Unsicherheiten, Komplexitäten und Mehrdeutigkeiten – zusammengefasst unter dem Akronym **VUCA** – stellt Organisationen, Unternehmen und ganze Wirtschaftsräume sowie Strukturen vor gravierende Herausforderungen. Technologische Disruptionen, geopolitische Verschiebungen sowie dynamische Bedürfnisse von Kunden beschleunigen den Innovationsdruck erheblich und unterminieren klassische Entscheidungslogiken sowie die Planung. Gleichzeitig verkürzt sich die Halbwertszeit von Wissen in vielen Branchen immer drastischer, was die langfristige Strategieauswahl und – Entwicklung parallel erschwert [CFK+21]. Diese Effekte werden durch die immer größere Bedeutung sogenannter Meta-Innovationen wie der **Künstlichen Intelligenz (KI) und dem Quantencomputing (QC)** oder gar deren kombinierten Anwendung weiter verstärkt [Fai24]. Beide Technologien wirken nicht nur als ein Teiber von Innovationen, sondern eröffnen auch neue Innovationspfade, indem sie die Geschwindigkeit, Komplexität und Tiefe technologischer Entwicklungen radikal transformieren und verschiedene innovative Anwendungen potenzieren (wie beispielsweise die Entwicklung neuer Datenschutzsysteme durch Quantenkommunikation) [Mai21]. Auch durch sich gegenseitig verstärkende und komplementäre Technologien – etwa durch KI-gestützte Quantenalgorithmen oder QC-beschleunigte Maschine Learning-Verfahren – können sie die Innovationsdynamiken in bisher ungekannter Weise weiter potenzieren [KMK+20]. Der Innovations- und Anpassungsdruck für Unternehmen wächst dadurch und zunehmende Antizipation, Resilienz, sowie strategische Vorausschau werden bedeutender [Mai21].

Klassische Trendanalysen, lineare Forecasting-Ansätze oder intuitive Strategieprozesse stoßen angesichts dieser Dynamik immer mehr an ihre Grenzen. Um unter diesen Bedingungen tragfähige Entscheidungen – v.a. Innovationsentscheidungen – zu treffen, bedarf es strukturierter, wissenschaftlich fundierter Foresights-Instrumente [MGH+25]. Insbesondere die Delphi-Methode und die Szenario-Planung werden in der Literatur als besonders geeignet betrachtet, um nicht-lineare Entwicklungen zu erfassen, kritische Unsicherheiten systematisch zu strukturieren und multiple Zukunftspfade zu explorieren – sie stehen nachfolgend deshalb im Zentrum der Betrachtung [GK22]. Dennoch ergeben sich gerade in der methodischen Anwendung dieser (auch in Kombination) im Kontext strategischer Innovationsentscheidungen, insbesondere mit Blick auf Meta-Innovationen (wie KI und QC) bislang noch offene Punkte. Beispielsweise die Frage danach, wie die Anwendung als Hintergrund zu Innovationsentscheidungen in Organisationen im Lichte von KI und QC helfen kann. Diese Forschungslücke soll hier als Grundlage des Beitrages dienen: Wie und in welchem Maße können Delphi-Methodik und Szenario-Planung als strukturierender „Innovationskompass“ in einer durch Meta-Innovationen beschleunigten Welt dienen – und welche strategische Relevanz entfalten sie dabei für innovationsgetriebene Entscheidungen in Organisationen? Oder, um dies auf den Punkt zu bringen: In welchem Umfang können diese Methoden als strategische Orientierungshilfe bei innovationsgetriebenen Unterscheidungen dienen?

Der vorliegende Beitrag verfolgt das Ziel ausgehend hiervon in einer **Meta-Innovationsstudie** die Hypothese (sowie Rolle und Wirksamkeit) zu überprüfen, dass die **Delphi-Methodik und**

Szenario-Planung als strategisches Steuerungsinstrument für Innovationen im technischen Meta-Innovationkontext immer bedeutender werden [Sar24]. Dabei steht die Delphi-Methodik auf Grund der im Kontext zur Verfügung stehenden Literatur vermehrt im Fokus. Es wird damit insbesondere die Schnittstelle zwischen Foresight-Methodologie, Innovationsmanagement und technologischem Umbruchprozess vor dem Hintergrund von KI und QC betrachtet. Die Hauptthese, die dabei im Ergebnis aufgezeigt werden soll, ist die folgende: Die Anwendung der Delphi-Methodik und Szenario-Planung entwickelt sich angesichts wachsender technologischer Unsicherheiten und beschleunigter Meta-Innovationspotenziale zu einem zentralen Steuerungsinstrument des strategischen Innovationsmanagements. Denn hier ermöglichen sich nicht nur strukturierte Auseinandersetzungen mit potenziellen Trends oder Zukunftsräumen, sondern auch zunehmend der konzeptionelle Rahmen und operativer Rahmen zu Innovationsentscheidungen.

2 Innovationen unter Druck: Navigieren unter KI, QC und im VUCA-Zeitalter

Die VUCA-Welt – geprägt von Volatility, Uncertainty, Complexity, Ambiguity - beschreibt eine Umwelt, die durch rasante Veränderungen, unklare Zukunftsperspektiven, vielschichtige und komplexe Zusammenhänge, sowie mehrdeutige Informationen geprägt ist [CFK+21]. Dies setzt Rahmenbedingungen für das Entscheiden und Wirtschaften von Organisationen und Unternehmen und erschwert es entsprechend. Vor diesem Hintergrund bildet die (theoretische) Analyse der VUCA-Welt einen wichtigen theoretischen Ausgangspunkt für den Beitrag. Insbesondere gilt es, die aktuellen Marktentwicklungen im Kontext der hervorgehobenen Technologien – KI und QC – näher zu beleuchten, da eben diese Dynamiken die Unsicherheiten der Umwelt maßgeblich verstärken. In dieser zunehmenden Komplexität und Schnelllebigkeit beschleunigen sich v.a. Innovationen, da es rasch auf Markt- und Technologiewechsel zu reagieren gilt [Mai23]. So ermöglicht es beispielsweise Künstliche Intelligenz (KI) riesige Datenmengen in Echtzeit zu analysieren und Entwicklungszyklen rasch zu verkürzen. Solche Innovationen und die Innovationsfähigkeit ist entscheidend, um sich am Markt halten zu können. Bereits jetzt erzielen Unternehmen, die frühzeitig auf KI gesetzt haben enorme Marktvorteile – Tendenz steigend [Mai21]. Gleichzeitig wird der Quantencomputer (QC) immer leistungsfähiger. Auch, wenn noch kein Quantenvorteil erzielt wurde, wird bereits in vielen Anwendungsbereichen von einem Quantennutzen gesprochen, in welchem Probleme genauso gut gelöst wurden, wie mit herkömmlichen Computersystemen [KEA+23]. Der QC liefert nicht nur zusätzliche Rechenkapazität, sondern vermag es darüber hinaus auch hochkomplexe Optimierungs- und Simulationsaufgaben (mit mehreren unbekannten Variablen) zu lösen, die herkömmlichen Rechner an ihre Grenzen bringen [Mai21]. So erschließt er in absehbarer Zukunft neue Innovationspfade, die den Innovationsdruck auf dem Markt wiederrum verstärken.

Unter diesen zunehmend erschwerten Bedingungen verlieren nun traditionelle, linear-historisierende Trendanalysen zunehmend ihren Aussagenwert. Unternehmen laufen hier Gefahr, sich in inkrementellen Verbesserungen zu verzetteln, statt tatsächliche disruptive oder radikale Potenziale zu erkennen und umzusetzen [Fer20]. Die permanent zu tätige Innovation schafft nicht nur Druck, sondern wird darüber hinaus wieder selbst zum zentralen Steuerungsfaktor:

Nur wer in der Lage ist künftige Gestaltungs- und Möglichkeitsspielräume zu erkennen und zu begreifen und diese auch wertschöpfend zu realisieren, kann im Wettbewerb bestehen [GK22]. Dabei ist Foresights (in unterschiedlicher Methodik) zu Trends am Markt ein zentrales Mittel, um sich besser in der VUCA-Welt zurechtzufinden und Prognosen, sowie Entscheidungen hin zu einer potenziellen Innovation treffen zu können. In der häufig vorherrschenden Unternehmenspraxis wird jedoch meist auf kurzfristige Trendanalysen und Technologiescouting gesetzt und reduziert. Diese Instrumente sind meist aktiv ausgerichtet und erfüllen selten den Anspruch tatsächliche alternative Zukünfte und tiefgreifende Disruptionen zu erfassen. Die Schwäche dieser Ansätze liegt in ihrer Linearität, der massiven Abhängigkeit an Daten aus der Vergangenheit, sowie ihrer Ignoranz gegenüber systematischer Wechselwirkungen [GK22].

Künstliche Intelligenz (KI) und Quantencomputing (QC) gehören zu den Meta-Innovationen [Fai24] bzw. können als disruptive Innovationen eine Vielzahl neuer Innovationen hervorbringen – Also das Innovationsgeschehen selbst transformieren und als Beschleuniger weitreichender Veränderungen fungieren [Mai21]. Diese Technologien wirken entsprechend in der heutigen VUCA-Welt als Treiber rasanter und tiefgreifender Marktveränderungen, auf die sich Organisationen auch mit Foresight-Prozessen vorbereiten müssen. So wird das KI-Zeitalter partiell bspw. bereits als „VUCA on steroids“ bezeichnet [DLM+25], auch wenn detaillierte Prognosen noch abzuwarten bleiben. KI-gestützte Lösungen beschleunigen Innovationszyklen bereits jetzt erheblich: Generative KI-Tools können etwa Produktentwicklungszeiten drastisch verkürzen und Innovationen befeuern. Laut McKinsey ergibt sich hier bereits eine Reduktion von Entwicklungszyklen um bis zu 70 Prozent – Das Lebenstempo steigt in Anlehnung daran [DLM+25]. Es kommt zu fortwährenden technologischen Disruptionen: Schon heute durchdringt KI nahezu alle Branchen und sorgt für Umbrüche, und die kommenden 5 Jahre werden noch weitaus tiefgreifende gesellschaftliche Veränderungen erwartet. KI eröffnet neue Möglichkeitsräume und beschleunigt die Konzeption neuer Produktideen, Marktstrukturen usw. Bspw. erlaubt generative KI die Erkundung zuvor undenkbarer Designlösungen [Mai21].

Auch das Quantencomputing besitzt das Potenzial, als Meta-Innovation ganze Märkte umzugestalten. Quantencomputer versprechen eine Sprunginnovation in der Rechenleistung und ermöglichen das Lösen komplexer Aufgabenstellungen (mit mehreren unbekannten Variablen), die Lösungsräume öffnet, welche klassischen Systemen unzugänglich waren [Fai24]. Dies betrifft u.a. die Arzneimittelentwicklung, Materialsynthese oder komplexe Optimierungsprobleme (auch im offenen System). Obwohl breit einsetzbare Quantencomputer und der Quantenvorteil noch nicht verfügbar sind, werden bereits entsprechende Kapazitäten aufgebaut. Dieser disruptive Faktor verdeutlicht, dass QC langfristig im Foresight berücksichtigt werden muss, wie etwa aufgrund potenzieller Technologieumbrüche (z.B. durch das Brechen heutiger Verschlüsselungsfaktoren oder radikaler Leistungssteigerung in Datenanalyse und Simulation). Zusammenfassend verdeutlicht der Hintergrund, dass die VUCA-Welt durch Meta-Innovationen (wie KI und QC) in besonderer Weise beschleunigt wird und dadurch traditionelle Analyseansätze an Aussagekraft verlieren; umso zentraler erscheint es, Foresight-Methoden systematisch

einzusetzen, um in diesem hochdynamischen Umfeld tragfähige Orientierungen für innovationsgetriebene Entscheidungen zu schaffen. Es ergibt sich in Summe der Umweltbeschreibung die in Bild 1 dargestellte Dynamik an (hypothetischen) Zusammenhängen:

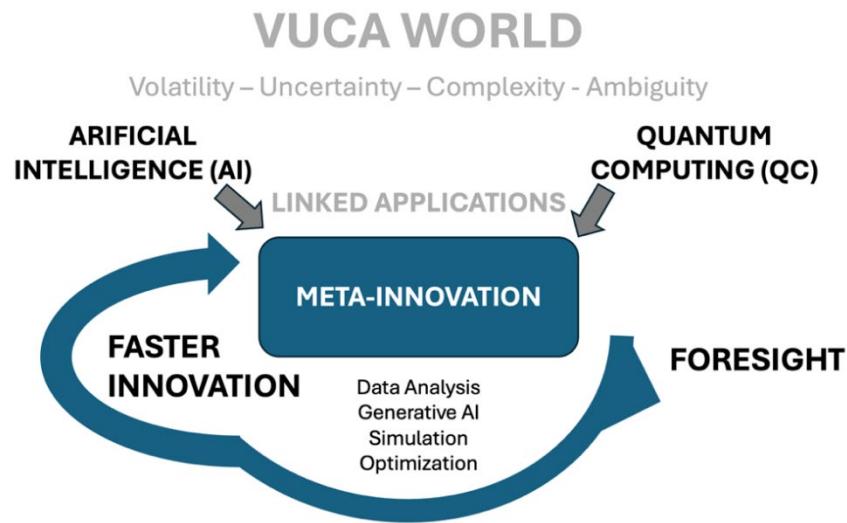


Bild 1: How Meta-Innovations foster Foresight (eigene Darstellung)

3 Foresight, Delphi-Methodik und Szenario-Planung als resiliente Antwort in einer dynamische Umwelt

Aufbauend auf der vertiefenden Betrachtung der Beschleunigung der VUCA-Welt durch Meta-Innovationen wie KI und QC, leitet sich die Notwendigkeit ab, systematische Verfahren der strategischen Vorausschau als Orientierungsmaßnahme einzusetzen. Die Darstellung und Einordnung der Methodiken bildet daher ein zentrales theoretisches Fundament, um deren Eignung und strategische Relevanz für innovationsgetriebene Entscheidungen im organisationalen Kontext zu untersuchen. Die strategische Vorausschau (Foresight) bedient sich nun einer Vielzahl wissenschaftlich fundierter Methoden, um zukünftige Entwicklungen unter Unsicherheit systematisch zu analysieren und deren Implikationen für Organisationen abzuleiten. In der Literatur wird ein Methoden- Repertoire von über 40 Verfahren beschreiben, das je nach Fragestellung, Datenlage, Zeithorizont und Beteiligungsgrad zum Einsatz kommt [GK22]. Grafisch lassen sich die Methoden im Zukunftsdiagramm, wie folgt verorten (Bild 2):



Bild 2: Future Diamond [Pop11]

Zu den prominentesten und bewährtesten Instrumenten zählen insbesondere die Delphi-Methode sowie die Szenario-Planung. Beide Verfahren zeichnen sich durch ihre Eignung zur Bewältigung komplexer, nicht-linearer Zukunftsfragen aus und bieten spezifische Vorteile gegenüber anderen Ansätzen, wie etwa der reinen Trendextrapolation, linearen Prognosemodellen oder deskbasierten Analysen [Cuh19]. Die Delphi-Methode steht im vorliegenden Beitrag vermehr im Fokus und ist ein iteratives Expertenbefragungsverfahren, das darauf abzielt, durch wiederholte Rückmeldung und Anonymität einen strukturierten Konsens oder divergente Standpunkte zu komplexen Fragestellungen zu erarbeiten. Sie basiert auf mehreren Befragungsrunden, in denen Experten: innen ihre Einschätzungen zu zukünftigen Entwicklungen abgeben, überdenken und auf der Grundlage aggregierter Rückmeldungen erneut bewerten [LT22]. Das reduziert systematische Verzerrungen, wie bei Face-to-Face-Gruppendiskussionen auftreten können (z.B. durch die Dominanz einzelner oder Gruppendynamiken). Die Vorteile der Delphi-Methode liegen insbesondere in der Möglichkeit, fundiertes Expertenwissen zu strukturieren und für strategische Zwecke verfügbar zu machen – auch in Bereichen mit geringer Datenverfügbarkeit [GK22]. Die Methode eignet sich entsprechend zur Identifikation von Konsens-, Dissens-Linien, Trendvalidierung sowie zur Abschätzung technologischer Durchbrüche oder regulatorischer Entwicklungen. Nachteile ergeben sich dagegen primär im zeitlichen und organisatorischen Aufwand sowie der hohen Abhängigkeit von der Qualität und Diversität der Expertengruppe – Sie liefern ein Meinungsbild mit Bandbreiten und keine klassische Prognose des Marktes [Kis17].

Die Szenario-Planung oder auch Szenario-Technik dient der systematischen Entwicklung und Analyse alternativer Zukunftsbilder. Sie basiert auf der Prämisse, dass die Zukunft nicht linear verläuft und nicht exakt prognostiziert werden kann, sondern durch multiple Entwicklungspfade und kritische Unsicherheit geprägt ist. Typischerweise werden drei bis vier Szenarien entwickelt, die sich durch unterschiedliche Ausprägung der Schlüsselfaktoren (z.B. der technologischen Entwicklung, politischen Rahmenbedingungen, gesellschaftliche Trends) unterscheiden [Sch91]. Die Vorteile der Szenario-Planung liegen in ihrer hohen Anschlussfähigkeit an strategische Entscheidungsprozesse, ihrer explorativen Tiefe sowie der Fähigkeit, implizite Annahmen explizit zu machen [GK22]. Sie ermöglicht es Organisationen, ihre Robustheit gegenüber verschiedenen Zukunftsfragen zu prüfen und sogenannten Frühindikatoren zur strategischen Früherkennung abzuleiten. Gleichzeitig erhöht die Szenario basierte Auseinandersetzung mit der Zukunft das organisatorische Zukunftsbewusstsein. Nachteile ergeben sich primär aus dem methodischen Aufbau, dem hohen Anspruch an interdisziplinäre Zusammenarbeit sowie die Gefahr, unwahrscheinliche, aber einflussreiche Entwicklungen (Wild Cards) zu unterschätzen, weshalb es besser ist diese bewusst zu integrieren [GK22]. Die Methoden lassen sich als komplementär verstehen und können zusammen geeignet sein, wenn die Datenlage, Umfeld oder Problemstellung hohe Unsicherheit und Komplexität aufweisen – wie etwa bei technologischen Sprunginnovationen, regulatorischem Wandel oder geopolitischen Umbrüchen [GK22]. Die Stärken beider Verfahren lassen sich also separat betrachten als auch kombinieren, wenn die Delphi-Methode bspw. zur Ermittlung und Bewertung von Schlüsselfaktoren dient, die anschließend in der Szenario-Planung verwendet werden – damit wird der Nutzen beider Methoden in einem integrativen Foresight-Prozess voll ausgeschöpft [JKS+07]. In der nachfolgenden Analyse des Beitrags wird die Szenario-Planung meist (nicht ausschließlich) als Ergänzung in der Betrachtung der Delphi-Methodik mituntersucht. Der Fokus und der Vergleich der hier in kürze angerissenen Methoden lässt sich weiterführend davon wie folgt extrahieren (Bild 3):

Vergleich ausgewählter Foresight-Methoden (qualitativ bewertete Kriterien)

		Partizipazion	3	3	1
Kriterium	Umgang mit Unsicherheit	2	3	1	
	Strategische Anschlussfähigkeit	3	4	2	
	Aufwand	3	3	1	
		Delphi-Methode	Szenario-Planung	Trendextrapolation	

Bild 3: Vergleich der Methodik (eigene Darstellung)

KI und QC dienen nun zum einen innerhalb von Foresight-Prozessen – gerade wegen dem beschriebenen hohen Datenaufwand – als leistungsstarkes methodisches Werkzeug, welches die

klassischen Zukunftsforschungs-Methoden weiterentwickelt. Moderne strategische Foresight-Ansätze verbinden etablierte kreative Techniken mit fortgeschrittenen Analytik und KI, um bessere dateninformierte strategische Entscheidungen zu ermöglichen [Wan25]. Insbesondere kann KI und zukünftig QC hier große Datenmengen aus vielfältigen Quellen analysieren und dadurch ein Horizon-Scanning und Trendfrüherkennung auf ein neues Niveau heben – v.a. in einer möglichen verknüpfenden Anwendung von KI und QC. Dies kann verschiedenste Foresight-Methodiken zu einem kontinuierlichen, automatisierten Prozess weiterentwickeln. QC kann ggf. komplexe Zukunftsmodelle und Szenarien berechnen, die herkömmliche Rechner noch überfordern, um das Erkunden der Zukunftsräume zu erweitern. Technologische Tools im Sinne von KI und QC werden im Sinne der Foresight-Landschaft immer wichtiger und führen auch hier zu neuen Innovationen - im Sinne des Meta-Innovationen-Potenzials in einem spezifischen Anwendungsfeld [Wan25].

In Summe nehmen KI und Foresight eine doppelte Rolle in Bezug auf die Foresight-Methodik ein: Zum einen, sind sie methodischer Enabler, die das Handwerkszeug der Zukunftsforschung selbst transformieren. Dargelegte Foresight-Methoden können mit KI-Unterstützung breite und tiefere Einsichten generieren, während in Zukunft das QC den Umgang mit Komplexität dahingehend weiter revolutionieren wird. Zum anderen – und hier liegt der thematische Schwerpunkt der Arbeit – ist KI und QC als Treiber der VUCA-Welt und von Meta-Innovationen selbst Gegenstand des Foresights und wird dadurch in seiner Anwendung als Innovationskompass immer zentraler – disruptive Megatrends, die das Umfeld von Organisationen volatil und unsicher gestalten und proaktive strategische Vorausschau in diese Richtung werden unabdingbar (siehe Kapitel 2). Der vorliegende Beitrag setzt sich also mit der Forschungslücke auseinander, wie spezifische Foresight-Methodiken v.a. der Szenario-Planung und Delphi-Methodik als Innovationskompass dienen können bzw. hier von immer größerer Bedeutung werden a) in einer immer schnelleren werdenden Welt (VUCA), die b) durch KI, QC, deren verknüpfte Anwendung hin zu dem potenzial zu Meta-Innovationen immer gravierender werden. Die Fragestellung lässt sich hier wie folgt zuspitzen: *Wie können spezifische Foresight-Methoden (Szenario-Planung/ Delphi-Methodik) – als strategischer Innovationskompass dienen, um Organisationen in einer zunehmend dynamischen Welt Orientierung zu bieten, die sich durch die beschleunigende Wirkung von Meta-Innovationen (KI, QC, verknüpfende Anwendung) grundlegend wandelt und immer schnelleren Innovationsdruck schafft?*

4 Methodisches Vorgehen

Die vorliegende Arbeit verfolgt den methodischen Ansatz zu einer Meta-Literaturanalyse, die darauf abzielt, vorhandene Forschungsergebnisse der Delphi-Methodik und der Szenario-Planung systematisch zu sichten, zu bewerten und integrativ zusammenzuführen. Im Unterschied zu einer rein quantitativen Meta-Analyse, die auf eine statistische Aggregation beruht, handelt es sich hier um eine qualitative Analyse hierzu strukturierter wissenschaftlicher Primär- und Sekundärliteratur [BT09]. Ziel ist es, dabei Muster, sowie theoretische Konvergenz und für die Anwendung relevante Erkenntnisse über die Nutzung dieser Foresight-Methoden zu gewinnen [WD25]. Es geht folglich um die Relevanz und Eignung der Szenario-Planung und Delphi-Methodik, mit Blick auf strategische Innovationsentscheidungen und die dahingehend fundierte

Bewertung – v.a. unter Entwicklungen der Meta-Innovation durch KI und QC. Damit schließt die Arbeit direkt an die zuvor ausgeführten Grundlagen zur Meta-Innovation (und VUCA-Welt) an.

Hierzu wurde Literatur gesichtet, die sich mit der Delphi-Methodik oder/ und Szenario-Planung im Lichte spezifischer Innovationsstrategien befasst oder diese anwendet. Der Hauptfokus des Beitrags liegt hier jedoch auf der Delphi-Methodik, die im genannten Kontext eine breitere Anwendung findet und eine entsprechend breitere Literatursichtung zulässt. Innerhalb der Literatursichtung wurden relevante Quellen identifiziert und entlang analytischer Kategorien ausgewertet [TH08]. Die Grundlage der Analyse bezieht sich final auf einen Korpus von 25 einschlägigen Publikationen – darunter Monografien, Fachartikel und Fallstudien – die sich methodisch mit der Delphi-Methodik und/ bzw. partiell ergänzt durch die Szenario-Planung angewandt auf ein Innovationsmanagement, v.a. im Lichte von aktuellen Entwicklungen mit KI und QC befassen. Da es zu letztem (QC) noch keine gravierende Fülle an Literatur gibt, liegt eine hierauf zentralisierte, aber dahingehend erweiterte Analyse vor, die Abstriche hinsichtlich der Abzeichnung im Innovationsmanagement und der der Delphi-Methodik und der Szenario-Planung in Kauf nehmen muss. Diese Einschränkung ist zugleich ein wichtiger Hinweis auf die Forschungsrelevanz, da gerade die Verbindung von Foresight-Methoden mit neuen Technologien wie QC in der Literatur noch unterrepräsentiert ist und somit besondere Erkenntnispotenziale bietet. Die finalen Auswahlkriterien der Publikationen bezieht sich auf die (R) Relevanz (v.a. mit Blick auf beide Themenanschnitte), die (A) Aktualität (Erscheinungsjahr 2006-2025) sowie (N) Anwendungsnähe (Technologie, Gesundheit usw.). Da die vorliegende Arbeit einen spezifischen Blick auf die aktuellen Beispiele von KI und Quantencomputing (als Meta-Innovation) legt, wurde bei der Beitragsauswahl spezifisch auf diese Themenfelder geachtet und dies grundlegend mit besonderer Relevanz miteinbezogen. Darüber hinaus wurde einschlägige Literatur mit spezifischen Fragen im Innovationsmanagement ausgewählt (möglichst in Verknüpfung zu KI und mit technischem Fokus). So wird zugleich die Brücke vom allgemeinen theoretischen Hintergrund zur methodischen Untersuchung geschlagen. Die Meta-Analyse hat dies Literatur entlang der folgenden Analyseachsen untersucht (nach Schema der Bild 4):

- 1) Einordnung der Einschätzung zur Eintrittswahrscheinlichkeiten (einer Innovation)
- 2) Wirkung auf die Innovationsorientierung in Organisationen
- 3) Beitrag zur Einschätzung technischer Entwicklungspfade: KI und Quantencomputing
- 4) Nutzen zur strategischen Gesamtentscheidung im Innovationskontext

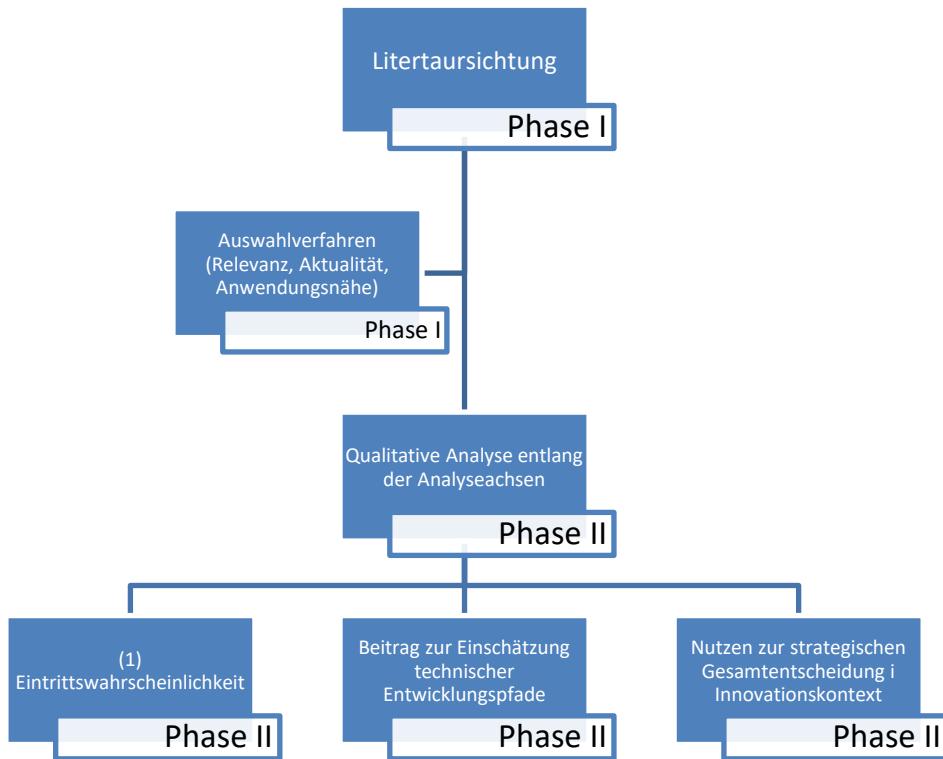


Bild 4: Methodisches Vorgehen

Innerhalb der ersten Phase wurde die Literatur von anfänglich > 100 gesichteten und evaluierten Beiträgen zwischen dem Jahr 2015 bis 2025 auf nach dem beschriebenen Auswahlverfahren auf 25 Publikationen reduziert (siehe Anhang 1). Bei der Relevanz war nicht nur der Innovationsmanagement-Bezug ausschlaggebend, sondern auch wie oft Werke zitiert wurden, ihre Wissenschaftlichkeit (double-blind Review Standards, Verlag usw.) sowie ihr Bezug zum zentralen Untersuchungsfokus in Verbindung zu KI und Quantencomputing (oder technischen Innovationsfeldern). Wobei an dieser Stelle anzumerken bleibt, dass die Methodik der Szenario-Planung und Delphi-Methodik im Fokus des Innovationsmanagement von Quantencomputing noch sehr selten sind (v.a. im Vergleich zu KI-Studien vor diesem Hintergrund). Hybride Studien von Innovationstreibern (QC, KI und IoT) sind hier häufiger und wurden entsprechend als Grundlage miteinbezogen. Die methodische Fokussierung soll daher nicht nur den Stand der Forschung abbilden, sondern auch verdeutlichen, wie diese Verfahren als strukturierter Rahmen für Innovationsentscheidungen in einer durch Meta-Innovationen beschleunigten VUCA-Welt dienen können.

Innerhalb der zweiten Phasen wurde ein Leitfaden zu derer qualitativen und kategorischen Analyse konzipiert, der sich konkret an den Forschungsfragen ausrichtet und sich an deren Beantwortung orientiert. Dabei wurde die Literatur entlang der drei Dimensionen (Relevanz, Aktualität Anwendungsnähe) qualitativ eingeschätzt und ausgewertet. Das Verfahren wurde an 25 Studien wie folgt nach Phase I durchgeführt und auf diese beschränkt (Auszugs-Beispiel Tabelle 1):

Tabelle 1: Auszug aus der Auswertung der Phase I.

Autor: in- nen, Jahr	Titel	Fokus	Beitrag	Auswahlbewertung		
				(R)	(A)	(N)
[AHH+25]	The Future of artificial intelligence: Insights from recent Delphi studies	AI	<i>Systematische Übersichtsarbeit analysiert Delphi-basierte Studien zur KI und bewertet deren Aussagekraft für zukünftige technologische, ökonomische und gesellschaftliche Entwicklungen.</i>	mittel	hoch	hoch
[Cuh20]	Horizon Scanning and Foresight: A state-of-the-art synthesis for innovation policy	AI	<i>Fundierte methodische Einordnung von Horizon Scanning und Foresight-Instrumenten zur strategischen Innovationspolitikgestaltung unter Unsicherheit, mit Fokus auf ihre Relevanz im technologischen Wandel.</i>	hoch	hoch	hoch
[MAG+23]	Foresight for AI in public service: Delphi Study on potential disruption	AI	<i>Die Delphi-basierte Studie identifiziert und bewertet potenzielle Disruptionsszenarien durch KI im öffentlichen Sektor, um Handlungsempfehlungen abzuleiten.</i>	hoch	mittel	hoch

5 Ergebnisse der Meta-Literaturanalyse

Ziel des Beitrages und der Meta-Literaturanalyse war es, die Einsatzweise und den strategischen Mehrwert der Delphi-Methodik und der Szenario-Planung im Kontext aktueller technologischer Innovationsentwicklungen – insbesondere Meta-Innovationen im Feld der Künstlichen Intelligenz (KI) und des Quantencomputing (QC) – systematisch zu analysieren. Auf Basis von 25 einschlägigen peer-reviewten Fachpublikationen¹ wurde qualitativ untersucht, wie diese Methodiken dazu beitragen, Unsicherheiten unter VUCA-Bedingungen und deren Beschleunigung durch Meta-Innovationen strukturiert zu adressieren und dahingehend fundierte Innovationsentscheidungen zu ermöglichen. Die Bewertung erfolgte (ebenso qualitativ ausgehend der Literatur selbst) entlang vier zentraler Analyseachsen: Eintrittswahrscheinlichkeit technologischer Entwicklung, Wirkung auf Innovationsorientierung, Beitrag zur Einschätzung technischer Entwicklungspfade mit besonderem Augenmerk auf KI und QC, sowie der strategische Nutzen für Organisationen.

Die qualitative Bewertung der Literatur erfolgte anhand einer Skala (quantitative Skala) von 0 bis 1, wobei 0 „trifft gar nicht zu“ und 1 „trifft voll zu“ entlang der vier Analyseachsen entspricht. Zwischenwerte (z.B. 0,6 oder 0,9) markieren Abstufungen, die den Grad widerspiegeln.

¹ Einige relevante Schriftstücke wurden miteinbezogen, ohne, dass ein wissenschaftlicher Peer-Review im eigentlichen Sinne vorliegt. Hier handelt es sich wenn um zentrale, weitläufige Untersuchungen, die von spezifischen Institutionen in Auftrag gegeben wurden und die sich auf große, geeignet und dennoch qualitativ hochwertige Quellen beziehen.

Die überwiegende Mehrheit der analysierten Studien bescheinigen der Delphi-Methodik und auch (soweit einbezogen) der Szenario-Planung je eine hohe strategische Relevanz. In 21 von 25 Fällen wurde der direkte Nutzen für strategische Entscheidungsprozesse in Organisationen explizit hervorgehoben – insbesondere im Hinblick auf das Erkennen disruptiver Entwicklungen, das Bewerten technologischer Reifegrade und das Ableiten robuster Handlungsoptionen. Einige Studien zeigen exemplarisch, wie die Szenario-Planung und Delphi-Basis zentrale Zukunftsvariablen (wie z.B. Datenverfügbarkeit, Reifegrad von KI-Systemen und regulatorische Unsicherheiten) operationalisieren und strategische Innovationspfade auch bzw. gerade unter vermehrtem Innovationsdruck identifizieren [KB23]. Die Ergebnisse der qualitativen Auswertung (Anhang 2) sind in der folgenden Abbildung (Bild 5) zusammengetragen:

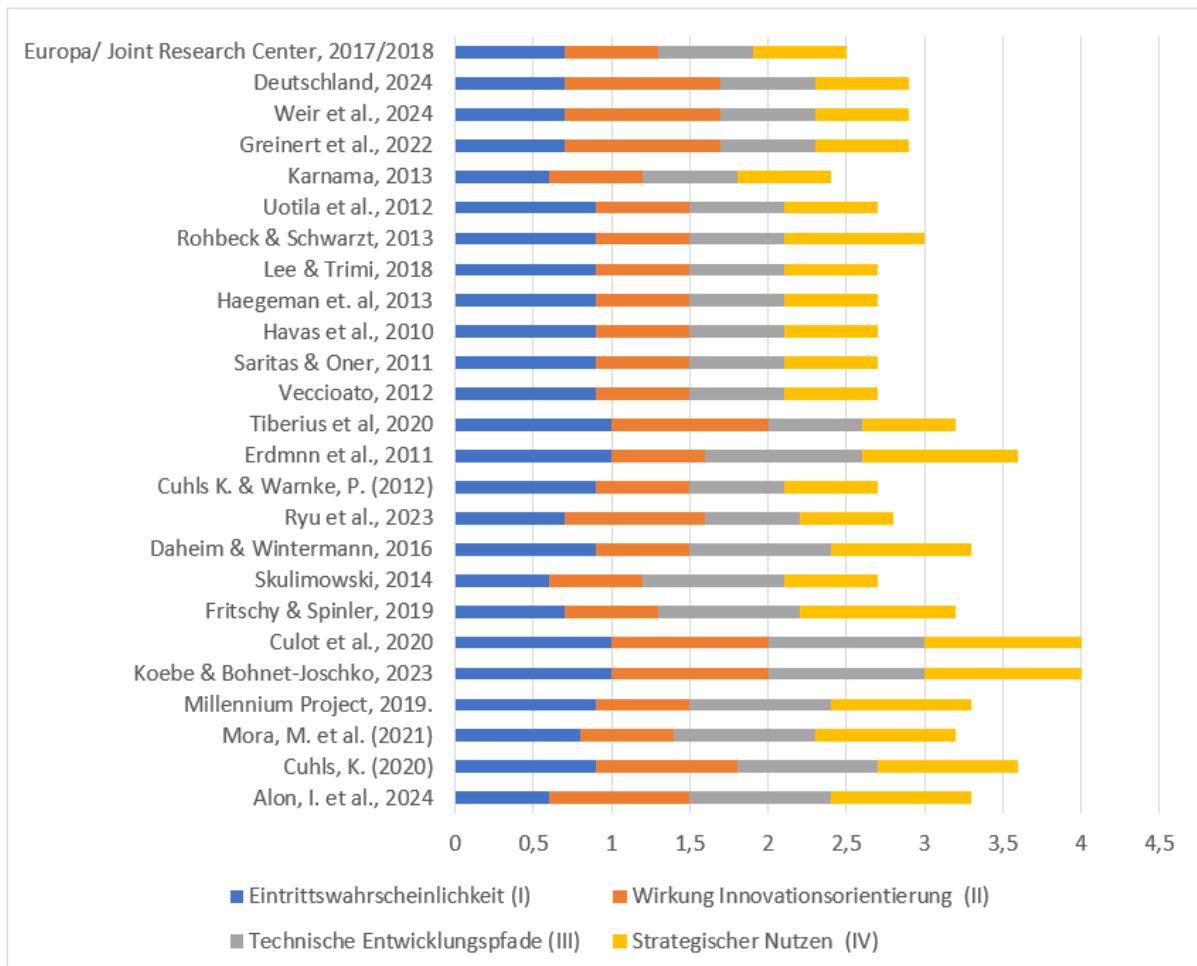


Bild 5: Zusammengefasste Ergebnisse der Meta-Literaturanalyse (eigene Darstellung)

5.1 Schwerpunkt KI und QC

Ein Großteil der gewählten Literatur (17 von 25 Studien) adressierte primär Fragestellungen im direkten oder indirekten Zusammenhang mit KI. Hierzu zählen sowohl sektorübergreifende Szenarien (wie beispielsweise zur Zukunft der Arbeit oder der Mobilität) als auch branchenspezifische Anwendungen (wie Smarte Krankenhäuser, Bildungssysteme, Fertigungsprozesse). Im Vergleich dazu ist die Anwendung der Delphi-Methode und auch der Szenario-Planung im

Bereich des Quantencomputing noch stark begrenzt, wenn gleich erste fundierte Studien vorliegen [GMB+23]. Der methodische Reifegrad ist im Bereich KI entsprechend viel weiter fortgeschritten, während QC v.a. in technologie-politischen Kontexten (wie strategischer Förderung, Ausbildungsplanung usw.) thematisiert wird [WDJ+24]. Gleichwohl zeigt sich bereits eine zunehmende methodische Angleichung, da nach und nach auch im QC-Bereich mehrstufige Delphi-Befragungen mit/ oder Szenario-Elementen zur Anwendung kommen.

5.2 Einschätzung zur Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkung

In 18 der analysierten Studien wurde eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit zentraler technischer Entwicklungen prognostiziert. Besonders deutlich wurde dies bei Anwendung von generativer KI, autonomen Systemen und der Industrie 4.0. Die Einschätzung der zur Eintrittswahrscheinlichkeit war dabei eng gekoppelt mit der Innovationsorientierung in Organisationen: Die Studien mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit identifizieren auch einen starken Einfluss auf strategische Innovationsausrichtung – z.B. mit Bezug auf Investitionsentscheidungen, Geschäftsmodelltransformationen oder Personalentwicklung. Die Studien mit QC-Fokus zeigen dagegen ein breites Spektrum an Einschätzungen, von optimistisch (praktikabler Quantenvor teil bis 2035) bis vorsichtig (nur sektorale Nischenanwendung bis 2040).

5.3 Delphi-Methode und Szenario-Planung als Instrumente zur systematischen Orientierung

Ein zentrales Ergebnis der Meta-Literaturanalyse ist die Rolle der Delphi-Methodik und der Szenario-Planung als methodisches Instrument zur systematischen Orientierung unter Unsicherheit. Hier zeichnet sich ein deutlicher Vorteil bei noch größerer Unsicherheit und Innovationsdruck durch Meta-Innovationen (KI und QC) ab. Szenarien und Befragungen, die auf strukturierten Expertinnen Einschätzungen basieren, bieten Organisationen eine kognitive Entscheidungsgrundlage, um multiple Zukunftsentwicklung simultan zu betrachten – ohne sich auf lineare Trends verlassen zu müssen. Dies ist vor alle im Umgang mit Meta-Innovationen, wie KI und QC und dem zunehmenden Druck bei gleichzeitig größerer Unsicherheit von Bedeutung – deren Wechselwirkungen, Rückkoppelungen und Anwendungsgeschwindigkeiten sich der klassischen Trendanalyse immer mehr entziehen. Die betrachteten Studien zeigen in der qualitativen Betrachtung deutlich, dass die Delphi-Methode und die Szenario-Planung hier als eine Art „Innovationsfilter“ fungieren, um kritische Unsicherheiten unter Meta-Innovationen zu strukturieren, technologische Entwicklungspfade abzubilden und robuste Innovationsentscheidungen und -Strategien abzuleiten.

6 Delphi-Methodik und Szenario-Planung als Steuerinstrument von Innovationen und Meta-Innovationen

Die Ergebnisse der Meta-Analyse verdeutlichen, dass die Delphi-Methode und Szenario-Technik (oder auch deren Kombination) ein hochwirksames Instrumentarium für strategische Innovationssteuerung darstellt – insbesondere in einem technologischen Umwelt, das zunehmend durch sogenannte Meta-Innovationen und den dadurch zunehmenden Innovationsdruck geprägt

ist (mit Fokus auf KI und QC). Dabei ist die Meta-Analyse vor allem aussagekräftig hinsichtlich des gelegten Fokus der Delphi-Methodik (die häufiger oder in Kombination mit Szenarien in die Literaturauswahl einbezogen war). Im Zuge der beschleunigten Vervielfältigung technologischer Neuerungen sowie ihrer multiplen Wechselwirkungen gewinnt die Fähigkeit, Unsicherheiten qualitativ-systematisch zu strukturieren, an immer zentralerer Bedeutung für Innovationsentscheidungen und -management von Organisationen und Institutionen. *Die Delphi-Methodik und Szenario-Planung verschieben den Fokus von retrospektiv-deskriptiver Trendverfolgung hin zu vorausschauender, gestaltender Zukunftsbearbeitung. In diesem Sinne fungieren die Methoden nicht mehr nur als reines Analysewerkzeug zur Abbildung möglicher, potenzieller Entwicklungen am Markt, sondern zunehmend zum Steuerungsinstrument für Innovationsdynamiken und Innovationsentscheidungen selbst.* Gerade bei (technologischen) Meta-Innovationen – die nicht nur wieder neue Produkte und weitere Technologien hervorbringen, sondern ganze Innovationsökosysteme transformieren (wie KI, die weitere KI beschleunigt) – ist eine methodisch kontrollierte Exploration alternativer Zukünfte und Potenziale entscheidend. Die Delphi-Methodik oder/ und die Szenario-Planung eröffnen hier verschiedene Möglichkeitsräume, in denen die Komplexität nicht minimiert, aber strukturiert handhabbar gemacht wird. Vor allem in zukünftiger Verbindung von KI und QC, die wiederum zur Beschleunigung und Weiterentwicklung von Forecast-Methodiken mit zunehmender Reife und Integration eingesetzt werden können, bieten sich hier weitreichende Optionen. So können automatische Textanalysen, semantische Clusterverfahren etc. helfen, Delphi-Runden zu systematisieren oder Szenario-Varianten robuster und schneller zu modellieren. Vor allem in Kombination mit Quantensimulationen verspricht sich eine hybride Foresight-Umgebung, in denen Expertisen verknüpft werden können.

Innerhalb der Betrachtung sei darauf hingewiesen, dass es an umfassenden, industriespezifischen Delphi-Methodiken und Szenario-Planung (und deren komplementären Kombination) fehlt, die Unsicherheiten, Innovationspfade und Eintrittswahrscheinlichkeiten für v.a. QC systematisch und branchenübergreifend kartieren. Eine Lücke in diese Richtung bezieht sich also v.a. auf die bislang geringe Literatur zu den betrachteten Foresight-Methodik im Quantencomputing. Auch die Integration von KI-basierten Foresight-Systematiken im genannten Konzept und darüber hinaus in der Anwendung (z.B. Generative KI zur Szenario Generierung usw.) ist methodisch, wie auch epistemologisch weitestgehend nicht erschlossen. Wie hier KI selbst Teil eines Foresight-Prozesses und zugleich Gegenstand der Szenarien sein kann, bleibt ein doppeltes Reflexionsproblem. Schließlich fehlt es auch an stärkeren wissenschaftlichen Fokus dahingehend, wie Delphi-Methodik und Szenarien-Planung systematisch in Innovationspolitik und Unternehmenssteuerung, sowie konkrete Innovationsentscheidungen integriert werden können.

7 Implikationen für die Praxis

Die Ergebnisse der Meta-Literaturanalyse machen deutlich, dass vor allem die Delphi-Methodik und auch die Szenarien-Planung im Kontext von Meta-Innovationen wie KI und QC nicht nur eine theoretische, sondern auch eine unmittelbar praxisrelevante Bedeutung besitzen – Ge-

rade da Organisationen und Unternehmen im Fokus der Forschungsfrage standen. Für Unternehmen und Institutionen lassen sich dahingehend abschließend folgende zentralen Implikationen ableiten und zusammenfassen:

7.1 Strategische Orientierung, Risikomanagement, Innovationssteuerung

Die Delphi-Methodik und die Szenario-Planung helfen Organisationen, technologische Unsicherheiten gezielt zu strukturieren und Handlungsoptionen in einem Umfeld zunehmender Volatilität zu entwickeln. Praktisch bedeutet dies, dass die Entscheidungsträger nicht nur Wahrscheinlichkeiten, sondern auch Alternativpfade und mögliche Brüche in ihre Planungen integrieren sollten, um resilenter gegenüber radikalen und disruptiven Entwicklungen zu werden. Die dargelegten Ergebnisse zeigen dahingehend vor allem, dass gerade die Dynamik von KI und QC klassische lineare Analysen überfordert. Unternehmen sind vor dem Hintergrund dieser Technologien gut beraten, Foresight-Methoden nicht lediglich als Trendradar, sondern als Steuerungsinstrument in Innovationsprozessen einzusetzen. Dies erfordert die institutionelle Verankerung der diskutierten Methoden und Foresights als integralen Bestandteil strategischer Innovationsprozesse.

7.2 Zukunftskompetenz und Technologische Integration von KI und QC

Die Delphi-Methodik und die Szenario-Planung dienen nicht nur der reinen Erarbeitung von Zukunftsbildern, sondern auch dem Aufbau eines geteilten organisationalen Zukunftsverständnisses. Für die Praxis bedeutet dies, dass durch partizipative Einbindung von Experten und Stakeholdern kollektive Lernprozesse angestoßen werden, die auch langfristig die Innovationsfähigkeit und Adapationskompetenz stärken. Die untersuchten Studien verdeutlichen dahingehend, dass KI und perspektivisch QC nicht nur Untersuchungsgegenstand, sondern zugleich methodischer Enabler künftiger Foresight-Prozesse sind. Praktisch eröffnet dies Möglichkeiten, wie z.B. durch KI-gestützte Textanalysen, Szenarien effizienter zu generieren oder durch QC komplexere Systemmodelle schneller abzubilden. Unternehmen sollten diese Technologien daher nicht nur beobachten, sondern aktiv in die methodische Weitereinwicklung ihrer Analysen und Foresights integrieren.

8 Konklusion

Im Zeitalter exponentiell beschleunigter Technologien, die Innovationen sind - die beschleunigt selbst wieder radikale und disruptive Innovationen (im Sinne einer Meta-Innovation) hervorbringen können – erweist sich die Delphi-Methodik und die Szenario-Planung (oder deren komplementäre Kombination) als vielversprechendes Steuerungsinstrument für strategische Innovationsentscheidungen – insbesondere dort, wo Komplexität, Unsicherheit und hochgradige technologische Disruption zusammentreffen. Auch, wenn viele Fragen offen bleiben, viele weitere Lücken ausgezeichnet wurden und die qualitative Meta-Literaturanalyse so nur einen spezifischen Ausschnitt betrachten kann, legt sie doch zentrales Nahe: Dass diese Foresight-Methoden nicht nur der strukturierenden Erfassung zukünftiger Entwicklungen dienen, sondern

auch die konzeptionelle Grundlage strategischer Zukunftsgestaltung, vor dem Hintergrund potenzieller Meta-Innovationen durch KI und QC, bilden. Weitere Foresight-Methodiken müssen hier erweitert abwogen oder integriert werden. Jedoch zeigt sich im immer größeren Innovationsdschungel: Vor allem die Delphi-Methode, als auch die Szenario-Planung dienen als Innovationskompass für Organisationen und Institutionen. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, bedarf es allerdings sowohl methodischer Weiterentwicklungen als auch integrativer Anwendungen in Praxis, Politik und Forschung sowie erweiterte Meta-Analysen auch im höheren quantitativen Sinne.

Anhang 1: Literaturauswahl Meta-Literaturanalyse

Übersicht der Literaturauswahl nach Phase (1):

Autor: innen, Jahr	Titel	Fokus	Beitrag	Auswahlbewertung		
				(R)	(A)	(N)
[AHH+25]	The Future of artificial intelligence: Insights from recent Delphi studies	AI	Systematische Übersichtsarbeit analysiert Delphi-basierte Studien zur KI und bewertet deren Aussagekraft für zukünftige technologische, ökonomische und gesellschaftliche Entwicklungen.	mittel	hoch	hoch
[BCG07]	Technology foresight using a Delphi Approach: a Japanese-German cooperation.	IM	Länderübergreifende Delphi-basierte Szenarien zur Priorisierung von Zukunftstechnologien für Forschungsförderung	mittel	mittel	hoch
[Cuh20]	Horizon Scanning in Foresight: Why Horizon scanning is only a part of the game	AI	Fundierte methodische Einordnung von Horizon Scanning und Foresight-Instrumenten zur strategischen Innovationspolitikgestaltung unter Unsicherheit, mit Fokus auf ihre Relevanz im technologischen Wandel.	hoch	hoch	hoch
[Deu24ol]	Begleitstudie für das BMWK; Quantencomputing im Aufbruch. Deutschland als Innovationsstandort	QC	Mehrstufige Delphi-Befragung zu kritischen Trends und Unsicherheit mit zentralen Empfehlungen zum Quantencomputing.	mittel	hoch	mittel
[DW16]	2050: The future of Work – Findings of an International Delphi Study of the Millennium Project.	AI	Ein Delphi-Bericht fließt in Szenario Entwürfe ein.	hoch	mittel	hoch
[ET21]	Voice-controlled intelligent personal assistants in health care: International Delphi study.	AI	Delphi-basiertes KI-Szenario im Gesundheitswesen.	mittel	hoch	hoch
[FS19]	The Impact of autonomous trucks on business models in the automotive and logistic industry – a Delphi-based scenario study.	AI	Veränderung in Mobility und Logistik durch KI.	mittel	mittel	hoch
[Giu13]	Futures, communication and social innovation: using participatory foresight and social media platforms as tools for evaluating images of the future among young people	IM	Delphi-Studie mit digitalen Experten zur Zukunft von sozialen Medien. Entwicklung von vier plausiblen Szenarien für Plattforminnovationen, Netzwerkeffekte und Regulation	hoch	mittel	mittel
[GMB+23]	Quantum Workforce; Competences, requirements, and forecasts	QC	Delphi-Studie (ohne Szenario-Technik) um Kompetenzen und Bildungsbedarf für die kommende Quantum Workforce zu ermitteln (Fokus Quantenkommunikation).	mittel	hoch	mittel
[GOS+20]	The Future of Manufacturing: A Delphi-Based Scenario Analysis on Industry 4.0.	AI	Studie untersucht, wie KI und Industry 4.0 Technologien Fertigungs-Supply Chains bis 2030 verändern.	hoch	hoch	hoch
[HMS+13]	Quantitative and qualitative approaches in future-oriented Technology analysis (FTA): From combination to integration?	IM	Kombination von Delphi, Szenarien und Wirkungsanalyse zur Innovationspolitikgestaltung in der EU	hoch	mittel	hoch
[HSW10]	The impact of foresight on innovation policy-making: recent experiences and future perspectives.	IM	Die Studie zeigt, wie Foresight-Methoden systematisch zur Gestaltung zukunftsorientierter Innovationspolitik beitragen können.	hoch	mittel	mittel
[KB23]	What's Next in Hospital Digitization? A Delphi-Based Scenario Study	AI	Studie untersucht, wie KI und digitale Transformation Krankenhäuser bis 2035 verändern.	hoch	hoch	hoch

[KTT+22]	Towards sustainable mobility – Transformative scenarios for 2034.	IM	<i>Delphi-basierte Szenario Untersuchung über den technologischen Wandel in der Mobilität.</i>	mittel	mittel	hoch
[LFT+17]	The Impact of Quantum Technologies on the EU's Future Policies: Part 3 Perspectives for Quantum Computing	QC	<i>Real-Time Delphi Studie zu Quantencomputing über die vielversprechendsten Forschungs- und Entwicklungsoptionen mit einem Zeithorizont bis 2030.</i>	mittel	mittel	mittel
[LT16]	Innovation for creating a smart future	IM	<i>Nutzung von Delphi zur Bewertung kritischer Innovationsbereiche (KI, IoT, Cloud) und Ableitung mehrere Zukunftsszenarien für smart societies mit Fokus auf digitaler Innovation im öffentlichen und privaten Sektor.</i>	hoch	mittel	mittel
[MAG+23]	Smart city government from an innovation management perspective: Theoretical framing, review of current practices, and future research agenda.	AI	<i>Die Delphi-basierte Studie identifiziert und bewertet potenzielle Disruptionsszenarien durch KI im öffentlichen Sektor, um Handlungsempfehlungen abzuleiten.</i>	hoch	mittel	hoch
[Mal23]	The future of the technology-based manufacturing in the European Union.	IM	<i>Delphi-Studie (ohne Szenario-Technik) zur Technologie-Vorausschau aus Schlüsseltrends, die QC als Schlüsselthema auszeichnet.</i>	hoch	hoch	mittel
[MP19]	Work/ Technology 2050: Scenarios and Actions	AI	<i>Eine 3 jährige internationale Studie mit verschiedenen Real-Time Delphi Studien, wie KI und ähnliche Technologien die Zukunft der Arbeit bis 2015 verändern,</i>	hoch	mittel	hoch
[RCL-23]	Future Paradigm Shift and Scenario Analysis for the Era of AI: On Perspective of Technology, Economic, Social and Politics.	AI	<i>Eine Delphi informierte Studie zur Szenario-Planung mit Künstlicher Intelligenz.</i>	mittel	hoch	mittel
[RS13]	The value contribution of strategic foresight: Insights from an empirical study of large European companies	IM	<i>Kombination von Delphi und Szenario-Workshops sowie Fallstudien zur Messung des Einflusses von Foresight auf Innovationsleistungen und Anwendung auf Industrieunternehmen.</i>	hoch	mittel	mittel
[SO11]	Systems thinking in foresight: Delphi-based scenario construction, Futures.	IM	<i>Methodologisch relevante Studie zur Verbindung von Delphi Cross-Impact-Matrix und Scenario-Konsistenzprüfung in innovationsnahen Feldern</i>	hoch	mittel	mittel
[THW19]	Prospective shifts in executive education: An international Delphi study.	IM	<i>Delphi-Befragung mit Bildungsexperten zur Innovationsentwicklung im Bereich EdTech, Fernlernen und digitaler Transformation im Bildungssektor</i>	hoch	hoch	mittel
[Vec12]	Environmental uncertainty, scenario planning and technological innovation: An integrated approach	IM	<i>Theoretisch fundierte Anwendung von Delphi-informierten Szenarien zur Innovationsstrategie in unsicheren Technologiefeldern.</i>	hoch	mittel	mittel
[WDJ+24]	Interlinked Computing 2040: Safety, Ownership, and Accountability	QC	<i>Die Delphi-basierte Szenario Studie untersucht den Zustand der Computertechnologie im Jahr 2040 und berücksichtigt Quantencomputing</i>	mittel	hoch	mittel

Anhang 2: Skalierte Auswertung Meta-Literaturanalyse

Zusammenfassung der skalierten Auswertung (auf der Skalierung von 0 -1; trifft gar nicht zu trifft voll zu) der Meta-Literaturanalyse:

Autor: in, Jahr	Eintrittswahrscheinlichkeit (I)	Wirkung Innovationsorientierung (II)	Technische Entwicklungspfade (III)	Strategischer Nutzen (IV)
[AHH+25]	0,6	0,9	0,9	0,9
[BCG07]	0,9	0,6	0,6	0,6
[Cuh20]	1,0	1,0	1,0	1,0
[Deu24ol]	0,9	0,6	0,9	0,9
[DW16]	0,7	1,0	0,6	0,6
[ET21]	1,0	0,6	1,0	1,0
[FS19]	0,6	0,6	0,9	0,6
[Giu13]	0,7	0,6	0,9	1,0
[GMB+23]	0,7	1,0	0,6	0,6
[GOS+20]	0,7	0,6	0,7	0,6
[HMS+13]	0,9	0,6	0,6	0,6
[HSW10]	0,9	0,9	0,9	0,9
[KB23]	0,9	0,6	0,6	0,6
[KTT+22]	1,0	1,0	1,0	1,0
[LFT+17]	0,9	0,6	0,6	0,6
[LT16]	0,7	0,6	0,6	0,6
[MAG+23]	0,6	0,6	0,6	0,6
[Mal23]	0,9	0,6	0,9	0,9
[MP19]	0,8	0,6	0,9	0,9
[RCL-23]	0,9	0,6	0,6	0,9
[RS13]	0,7	0,9	0,6	0,6
[SO11]	0,9	0,6	0,6	0,6
[THW19]	1,0	1,0	0,6	0,6
[Vec12]	0,9	0,6	0,6	0,6
[WDJ+24]	0,9	0,6	0,6	0,6

Literatur

[AHH+25] ALON, I.; HAIDAR, H.; HAIDAR, A.; GUIMON, J.: The Future of artificial intelligence: Insights from recent Delphi studies. *Futures*, Vol. 165, 103514, 205. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2024.103514>

[BT09] BARGETT-PAGE, E.; THOMAS, J.: Methods for synthesis of qualitative research: a critical review. *BMC Med Res Methodol.* 11:9, 59, 2009.

[BCG07] BREIER, S.; CURLS, K., GRUPP, H.: Technology Foresight using a Delphi Approach: a Japanese-German cooperation. *R&D Management*, 24(2), 141-153, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9310.1994.tb00866.x>

[CFK+21] CARBON, C, FAIX, W., KISGEN, S., MERGENTHALER, J, MURALTER, F, SCHWIMM, A., WINDISCH, L.: LEIN, R.: Steinbeis-Innovationsstudie. Steinbeis-Edition, Stuttgart, 2021. ISBN: 978-3-95663-264-8

[CHS19] COCKBURN, I. M., HENDERSON, R., STERN, S.: The Impact of Artificial Intelligence on Innovation: An Exploratory Analysis. In *The Economics of Artificial Intelligence*, Agrawal, A., Gans, J. & Goldfarb, A. (eds.). Chicago: The University of Chicago Press, 2019. ISBN 978-0-226-61333-8

[Cuh19] CUHLS, K.: Die Delphi-Methode – eine Einführung. In: Niederbergern M. & Renn, O. (Hrsg.), *Delphi-Verfahren in den Sozial- und Gesundheitswissenschaften*, Springer VS, 3-31., 2019. DOI: 10.1007/978-3-658-21657-3_1

[Cuh20] CUHLS, K. E.: Hoizon Scanning in foresight – Why Horizon Canning is only a part of the game. *Futures & Foresight Sciences*, John Wiles & Sons, Vol 2(1), March, 2020.

[COS+20] CULOT, G., ORZES, G, SARTOR, M., NASSIMBENI, G.: The Future of Manufacturing: A Delphi-Based Scenario Analysis on Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Changes*, Vol. 157, August, 120092, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120092>

[DW16] DAHEIM, C., WINTERMANN, O.: U2050: The future of Work – Findings of an International Delphi Study of the Millenium Project. Bertelsmann Stiftung, 2016. https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/BST_Delphi_E_03lay.pdf

[Deu24ol] DEUTSCHLAND: Deutschland als Innovationsstandort. Begleitstudie für das BMWK; Quantencomputing im Aufbruch, 2024. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Meldung/2024/20240220-studie-deutschland-innovationsstandort-automatisierte-vernetzte-fahren.html>

[DKK+21] DOMINO, K., KINORCZYK, M., KREWIEC, K., JALOWIECKI, K, GRADE, B.: ULOT, G., ORZES, G, SARTOR, M., NASSIMBENI, G.: Quantum computing approach to railway dispatching and conflict management optimization on single-track railway lines, 2024. arXiv:2010.08227v3.

[DLM+25] DURTH, S., LAVOIE, J., MAOR, D., ROTH, A.: Take a human-centric approach to avoid AI's Leadership trap. McKinsey & Company, Feb. 10, 2015. <https://karriere-upgrade.mckinsey.de/capabilities/people-and-organizational-performance/our-insights/the-organization-blog/take-a-human-centric-approach-to-avoid-ais-leadership-traps>

[ET21] ERMOLINA, A., TIBERIUS, V.: Voice-controlled intelligent personal assistants in health care: International Delphi study. *J Med Internet Res.*, Apr 9; 23(4), 2024. DOI: 10.2196/25312

[Fai24] FAIX, A.-V.: Quantum Industry: Future Viability and the Great Challenges. *Global Business & Economics Anthology*, II, 129-140, 2024. DOI: 10.47341/GBEA.241211

[Fer20] FERNANI, A.: Corporate Foresight: A new frontier for strategy and management. *Academy of Management Perspective*, Vol. 36, No.2, 2020. <https://doi.org/10.5465/amp.2018.0178>

[FD19] FRITSCHY, C., SPINLER, S.: The Impact of autonomous trucks on business models in the automotive and logistic industry – A Delphi-based scenario study. *Technological Forecasting and Social Changes*, Vol. 148, November, 119736, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119736>

[Kis17] KISGEN, S.: The Future of Business Leadership Education in Tertiary Education in Tertiary Education for Graduates. Steinbeis-Edition, 2017.

[GK22] VON DER GRACHT, H., KISGEN, S.: *Management der Zukunft. Spielregeln, Methoden und Erfolgsmodelle des Zukunftsmanagements*. Springer Gabler, 2022.

[GMB+23] GREINERT, F., MÜLLER, R., BLITZNBAUER, P., UBBE, M. S., WEBER, K.-A.: Quantum Workforce; Competences, requirements, and forecasts. *Physical Review Physics Education Research*, 19, 010137, 2023. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010137>

[Gui13] GULLIO, M.: Futures, communication and social innovation: using participatory foresight and social media platforms as tools for evaluating images of the future among young people. *European Journal of Futures Research*, Vol. 1, N. 17, 2013. <https://doi.org/10.1007/s40309-013-0017-2>

[HSW10] HAVAS, A., SCHARTINGER, D., WEBER, M.: The Impact of Foresight on Innovation Policy-Making: Recent Experiences and Future Perspectives (March). *Research Evaluation*, Vol. 19 (2010), No. 2, pp. 91-104 [archived in compliance with the publisher's policy], 2010. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1633021>

[HMS+13] HEAGEMAN, K., MARINELLI, E., SCAPOLO, F., RICCI, A., SKILOY, A.: Quantitative and qualitative approaches in future-oriented Technology analysis (FTA): From combination to integration? *Technological Forecasting and Social Changes*, Vol. 80, Issue 3, March, 386-397, 2013.

[JKS+07] JAKOB, M., KIEHNLE, D. O., SCHWARZ, H., KAISER, F., BEUCKER, S., ULLIO, M.: Delphi gestütztes Szenario-Management und -Monitoring. Eine Methode zur Beobachtung von Zukunftsentwicklungen und deren Nutzung im unternehmerischen Innovationsprozess. Fraunhofer IRP Verlag, Stuttgart, 2007. ISBN: 978-3-8167-7449-5.

[KEA+23] KIM, Y., EDDINS, A., ANAND, S., WIE, K. X., VAN DEN BERG, E., ROSENBLATT, S., NAYFEH, H., WU, Y., ZALETEL., M., TEMME, K., KANDALA, A.: AVAS, A., SCHARTINGER, D., WEBER, M.: Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance. *Nature* 618, 500-505, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06096-3>

[KMK+20] KLEESIEK, J., MURRAY, J., STACK, C., KAISSIS, G., BAREN, R.: Wie funktioniert maschinelles Lernen. *Der Radiologe*, Vol. 60, Issue 1, 24, 2020.

[KZT23] KLAU, D., ZÖLLNER, M., TUTSCHKU, C.: Bringing quantum algorithms to automated machine learning. *Frauenhofer IAO*, 2023. arXiv:2310.04238v1.

[KB23] KOEBE, P., BOHNET-JOSCHKO, S.: What's Next in Hospital Digitization? A Delphi-Based Scenario Study. *European Journal of Futures Research* 11, Article number 10., 2023. <https://doi.org/10.1186/s40309-023-00222-0>

[KBT+23] KOßMANN, G., BINKOWSKI, L., TUTSCHKU, C., SCHWONNEK, R.: Open-shop scheduling with hard constraints. *Quantum Physics*, 2023. arXiv:2211.05822.

[LT16] LEE, S. M., TRIMI, S.: Innovation for creating a smart future. *Journal of Innovation & Knowledge* 3(1), 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jik.2016.11.001>

[LT22] LINDSTONE, H. A., TUROFF, M.: *DELPHI Method: Techniques and Applications*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 2022.

[LFT+17] LEWIS, A. M., FERIGATO, C., TRAVAGNIN, M., FLORESCU, E.: The Impact of Quantum Technologies on the EU's Future Policies: Part 3 Perspectives for Quantum Computing; EUR 29402 EN, 2017. Doi: 10.2760/737170

[Mai21] MAINZER, K.: *Quantencomputer: Von der Quantenwelt zur Künstlichen Intelligenz*. Springer Verlag, 2021. DOI: 10.1007/978-3-662-61998-8

[Mai23] MAINZER, K.: *Zukunft durch nachhaltige Innovation. Im Wettkampf der Systeme*. Springer Verlag, 2023. ISBN-13: 978-3662663257

[Mal23] MALIK, A. K.: The future of the technology-based manufacturing in the European Union. *Results in Engineering*, Vol. 19, 101256, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101356>

[Mil23] MILLENIUM PROJECT: *Work/ Technology 2050: Scenarios and Actions*. The Millennium Project. 2019. ISBN-13: 978-0-9882639-7-0

[MAG+23] MORA, L., GERLI, P., ADRITO, L., PETRUZZELLI, A. M.,: Smart city government from an innovation management perspective: Theoretical framing, review of current practices, and future research agenda. *Technovation*, Vol. 123, May, 2023, 102727. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2023.102717>

[MGH+25] MÜBIGMANN, B., VON DER GRACHT, H., HARTMANN, E.: Foresight Scenarios: The Future Impact of Technology in Freight Forwarding, an International Delphi Study. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 72, 2025, 308-325. DOI: 10.1109/TEM.2023.3264112

[Pop11] POPPER, R.: 21st Century Foresight. Alliance Manchester Business School, IMP Innovation, Strategy and Sustainability. University of Manchester, 2011.

[RS13] ROHRBECK, R., SCHWARZ, J. O.: The value contribution of strategic foresight: Insights from an empirical study of large European companies. *Technological Forecasting and Social Change* 80(8), 2013. DOI: 10.1016/j.techfore.2013.01.004

[RCL+23] RYU, S., CHO, H., LEE, K., CHOI, M.: ORA, L., GERLI, P., ADRITO, L., PETRUZZELLI, A. M.,: Future Paradigm Shift and Scenario Analysis for the Era of AI: On Perspective of Technology, Economic, Social and Politics. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, Singapore, 2023, pp. 0350-0354, 2023. doi: 10.1109/IEEM58616.2023.10406592.

[Sar24] SARITAS, O.: Foresight in the Twenty-First Century and Methodological Advantages. In: Saritas, O., Sokolov, A., Cele, M. (Hrsg.), 21st Century Foresight. Science, Technologie and Innovation Studies. Cham, Springer Nature, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69557-5_2

[Sch91] SCHWARZ, P.: The Art of the Long View. Bantam Doubleday Dell Publishing Group. 1991.

[SZK+23] STÜHLER, H., ZÖLLNER, M.-A., KLAU, D., BEIDERWELLEN-BEDRIKOW, A., TUTSCHKU, C.: Benchmarking Automated Machine Learning Methods for Price Forecasting Applications. Computer Science. 2023. arXiv:2304.14735.

[TH08] THOMAS, J., HARDEN, A.: Methods for the thematic synthesis of qualitative research in systematic reviews. *BMC Medical Research Methodology*, 8: 45.

[WD25] WALSH, D., DOWNE, S.: Meta-synthesis method for qualitative research: a future review. *J adv Nurs.*, Apr; 50(2), 204-211, 2005. doi: 10.1111/j.1365-2648.2005.03380.x.

[Wan25] WANG, F.: OPPER, R.: Collaborative Foresight in the Age of AI: A Framework for Evolving Human-AI Dynamics in Strategic Decision-Making and Futures Research. Strategic Foresight Working Group, 2025. DOI: 10.13140/RG.2.2.30120.07689

[WDJ+24] WEIR, C., DYSON, A., JOUNOLA, O., DENNIS, L., PAXTON-FEAR, K.: Interlinked Computing 2040: Safety, Ownership, and Accountability. *Computer*, Vol. 57, Issue 1, January, 2024. <https://doi.org/10.1109/MC.2023.3318377>

Autoren

Dr. des. Anna-Vanadis Faix ist Philosophin und Wirtschaftswissenschaftlerin und geschäftsführende Gesellschafterin der Alma Mater Europaea – ECH. Sie hat an der Ludwigs-Maximilians Universität München in Philosophie und Politikwissenschaften promoviert und Philosophie, Volkswirtschaftslehre und Physik an der Eberhard Karls Universität Tübingen, der University of Cambridge und der Universita di Padova studiert. Sie ist als Lehrkraft an der School of International Business and Entrepreneurship (SIBE) tätig, wo sie auch ein Studium in Leadership absolviert hat und als wissenschaftlicher Mitarbeiter fungiert. Sie ist Mitglied der deutschen Gesellschaft für Philosophie (DGPhil), der Internationalen Social Ontology Society (ISOS) und wurde von der Internationalen Business and Economic Society mit Exzellenz in der Forschung ausgezeichnet.

Prof. Dr. Heiko von der Gracht ist Professur für Foresights und Digitale Transformation an der Universität für Weiterbildung Krems und wurde von Stanford/ Elsevier in den Jahren 2019-2024 zu den 2% der weltweit meistzitierten Forschern gezählt. Er war wissenschaftlicher Assistent an der EBS Universität für Wirtschaft und Recht, wo er zum Thema Zukunftsforschung promovierte. Er erwarb Abschlüsse als Diplom-Wirtschaftsingenieur (FH) der Hochschule Niederrhein, als Ingenieur der Fontys University of Applied Sciences Venlo, sowie einen Master of Science von der University of Plymouth in England. Er gründete 2009 das Center für Zukunftsforschung und Wissensmanagement an der EBS Universität für Wirtschaft und Recht, das er in den Folgejahren zu einem eigenen Hochschulinstitut entwickelte. Er gehört dem Global Foresight Network des Weltwirtschaftsforums (WEF) an und ist als Botschafter für dessen Global Collaboration Village (Forum Metaverse) tätig.

Prof. Dr. Stefanie Kisgen ist Professorin für Leadership an der School of International Business and Entrepreneurship (SIBE). Sie ist geschäftsführende Gesellschafterin der Alma Mater Europaea – ECH sowie der School of International Business and Entrepreneurship (SIBE) mit derzeit 300 Studierenden in Masterstudiengängen und 5.000 Absolventinnen. Sie ist Gründerin der SIBE Scientific Projects GmbH (SISP) und Mitglied des Vorstandes von Unternehmer Baden-Württemberg. Sie hat in Leadership Education an der Ludwigs-Maximilians Universität München promoviert und Business Administration und Regionalwissenschaft China an der Universität Köln und der Steinbeis-Hochschule Berlin studiert.

Session II

Fallstudienbasierte Analyse der Integration generativer KI-Werkzeuge in die strategische Vorausschau

**Malte Busch¹, Deepak Kumar¹, Bhavesh Jain¹, Johann Valentowitsch¹,
David Wurster¹**

¹ Fraunhofer ISI, Joint Innovation Hub, malte.busch@isi.fraunhofer.de,
deepak.kumar@isi.fraunhofer.de, bhavesh.mahender.jain@isi.fraunhofer.de,
johann.valentowitsch@isi.fraunhofer.de, david.wurster@isi.fraunhofer.de

Zusammenfassung

Angesichts wachsender Unsicherheiten und eines zunehmenden Innovationsdrucks gewinnt die strategische Vorausschau als methodischer Ansatz zur Gestaltung zukunftsrobuster Unternehmensstrategien zunehmend an Bedeutung. Der Beitrag untersucht, wie generative KI-Werkzeuge in diesen Prozess integriert werden können, um insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) datenbasierte Entscheidungsgrundlagen zu bieten. Anhand zweier kontrastierender Fallstudien zeigt die Arbeit, wie KI-gestützte Instrumente in den Phasen des Perceiving, Prospecting und Probing strategischer Optionen eingesetzt werden. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass KI nicht nur die Effizienz und Objektivität strategischer Analysen erhöht, sondern auch neue Perspektiven eröffnet, die über etablierte Routinen hinausgehen. Gleichzeitig wird die Bedeutung menschlicher Expertise für die Interpretation und Bewertung der KI-Ergebnisse hervorgehoben. Der Beitrag diskutiert Chancen und Herausforderungen des KI-Einsatzes in KMU, identifiziert Limitationen der Studie und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschung.

Schlüsselworte

Strategische Vorausschau, Künstliche Intelligenz (KI), Szenarioanalyse, Roadmapping, Trendradar, Kleine und mittlere Unternehmen (KMU)

A case study-based analysis of the integration of generative AI tools into strategic foresight

Abstract

In light of growing uncertainty and increasing innovation pressure, strategic foresight is gaining importance as a methodological approach for shaping resilient corporate strategies. This paper explores how generative AI tools can be integrated into foresight processes to provide data-driven decision support, particularly for small and medium-sized enterprises (SMEs). Drawing on two contrasting case studies, the study illustrates how AI-supported instruments are applied across the phases of perceiving, prospecting, and probing strategic options. The findings demonstrate that AI not only enhances the efficiency and objectivity of strategic analyses but also opens up new perspectives that go beyond established routines. At the same time, the importance of human expertise in interpreting and evaluating AI-generated insights is emphasized. The paper discusses the opportunities and challenges associated with AI adoption in SMEs, identifies limitations of the study, and offers a perspective for future research.

Keywords

Strategic Foresight, Artificial Intelligence (AI), Scenario Analysis, Roadmapping, Trend Radar, Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs)

1 Einleitung

Strategische Vorausschau ist ein systematischer, wissenschaftlich fundierter Prozess zur Identifizierung, Analyse und Bewertung möglicher zukünftiger Entwicklungen [Cuh24], [Mie19]. Strategische Vorausschau als Methode zielt darauf ab, Entscheidungsträger in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft bei der Entwicklung robuster Strategien unter Unsicherheit zu unterstützen [WPV+21]. Dabei handelt es sich nicht um die Vorhersage der einen Zukunft, sondern um die Auseinandersetzung mit möglichen, wahrscheinlichen und wünschenswerten Zukünften, um eine Orientierungshilfe für die Planung und Umsetzung strategischer Entscheidungen zu bieten [FS16].

In vielen Organisationen wird die strategische Vorausschau zunehmend institutionalisiert, um langfristiges Denken zu fördern und sich auf komplexe Herausforderungen einstellen zu können [WPV+21]. Dabei wird eine Vielzahl von Methoden wie zum Beispiel Szenarioanalysen, Delphi-Studien, Trendanalysen oder Simulationen eingesetzt [VK22]. Der Fokus liegt dabei oft auf technologischen und gesellschaftlichen Megatrends, die den Handlungsspielraum von Organisationen maßgeblich beeinflussen [SWM+19].

Mit der zunehmenden Verbreitung KI-gestützter Methoden hat sich die strategische Vorausschau in den vergangenen Jahren deutlich weiterentwickelt [CDF+25], [KW24], [FTJ+23]. Das Zusammenspiel von menschlicher Intuition und maschineller Analyse eröffnet heute neue Möglichkeiten, Frühindikatoren für Veränderungen zu erkennen und neue Trends zu antizipieren [BM21]. Denn mit Hilfe von künstlicher Intelligenz lassen sich große Mengen strukturierter und unstrukturierter Daten analysieren, zum Beispiel aus sozialen Medien, wissenschaftlichen Veröffentlichungen oder Wirtschaftsindikatoren. Dadurch werden die Möglichkeiten der traditionellen Analyse erheblich erweitert [BD23], [RNL+23].

Studien zeigen, dass der Einsatz von künstlicher Intelligenz die Fähigkeit von Entscheidungsträgern stärkt, mit Unsicherheiten umzugehen, fundierte Risikobewertungen vorzunehmen und zukunftsorientierte Strategien zu entwickeln [Per24], [GGW+22]. Allerdings ersetzt künstliche Intelligenz (KI) nicht den Menschen. Sie kann zwar enorme Datenmengen effizient analysieren und Muster erkennen, aber es fehlt ihr an einem tieferen Verständnis der sozialen, kulturellen und politischen Zusammenhänge. KI-gestützte strategische Vorausschau bleibt daher auf die reflektierte Bewertung durch den Menschen angewiesen – insbesondere, wenn es um das Verständnis komplexer sozialer, kultureller und politischer Zusammenhänge geht, die sich nicht allein aus Daten ableiten lassen [Has25]. Vielmehr handelt es sich um einen kreativen und normativen Diskurs, in den Menschen ihre Werte, Visionen und strategischen Ziele einbringen – Dimensionen, die KI weder eigenständig entwickeln noch bewerten kann. Auch der Umgang mit Ambiguitäten und Widersprüchen bleibt eine genuin menschliche Fähigkeit [KKD+23]. Letztlich stellt sich bei der Vorausschau die Frage: Welche Zukunft ist wünschenswert? Das ist eine ethische und politische Entscheidung, die menschliche Verantwortung erfordert [Cuh24].

Trotz der oben genannten Einschränkungen bietet KI ein enormes Potenzial: Sie kann verborgene Muster und Trends in großen Datenmengen aufdecken, datenbasierte Szenarien erstellen und validieren und als intelligenter Assistent in Workshops oder Planungsprozessen integriert

werden [SWM+19]. Dies stärkt die Objektivität und Nachvollziehbarkeit von Zukunftsannahmen und ermöglicht es so, fundiertere Schlussfolgerungen zu ziehen [Per24].

Der Einsatz von KI kann vor allem für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) von entscheidendem Vorteil sein [KS23]. Denn KI ermöglicht es, zeitaufwändige Analysen zu automatisieren, Ressourcen zu sparen und dennoch fundierte strategische Entscheidungen zu treffen. KI-gestützte Szenarioanalysen helfen also KMUs, robuste Strategien für die Zukunft zu entwickeln – auch ohne große Budgets und Know-How [SPK+24]. Darüber hinaus können Mitarbeiter über interaktive Tools wie Chatbots oder Dashboards aktiv in den Prognoseprozess eingebunden werden, was Kreativität, Akzeptanz und strategisches Denken im Unternehmen fördert [CPZ+25].

Trotz dieses Potenzials ist der Einsatz von KI für die strategische Vorausschau in KMU bislang nicht weit verbreitet. Laut einer Studie des Instituts der deutschen Wirtschaft (IW) setzen nur etwa 17,6 % der KMU in der Industrie und bei industrienahen Dienstleistungen KI ein. Im Vergleich dazu sind es bei großen Unternehmen fast 40 % [DG21]. Neuere Studien, z.B. von Bitkom, zeigen jedoch, dass KMU zunehmend aufholen: Mehr als die Hälfte der Unternehmen in Deutschland nutzen KI inzwischen aktiv, insbesondere in strategischen Bereichen wie Szenarioentwicklung und Trendbeobachtung [Bit24]. Dennoch bleibt der gezielte Einsatz von KI in der strategischen Vorausschau bislang die Ausnahme und ist noch nicht flächendeckend etabliert.

Vor diesem Hintergrund verfolgt dieser Beitrag zwei Ziele. Erstens sollen anhand von aktuellen Fallstudien die Potenziale und Herausforderungen des Einsatzes von KI in der strategischen Vorausschau für KMU aus der Praxis heraus aufgezeigt werden. Zweitens wird erörtert, wie der gezielte Einsatz von KI zu wettbewerbsfähigeren Strategien führen und die Rolle der Mitarbeiter aufwerten kann. Es wird exemplarisch ausgeführt, wie KMU mit Hilfe KI-gestützter Tools große Datenmengen zu politischen, wirtschaftlichen, technologischen und ökologischen Trends auswerten können, um ihr Umfeld gezielter zu beobachten und fundiertere Aussagen über die Entwicklung relevanter Einflussfaktoren zu treffen.

2 Konzeptioneller Rahmen

Dieses Kapitel dient der Eingrenzung und begrifflichen Präzisierung zentraler Konzepte der vorliegenden Arbeit. Im Fokus stehen die strategische Vorausschau als methodisches Fundament sowie der Einsatz von Künstlicher Intelligenz als technologischer Verstärker innerhalb dieses Prozesses.

Die strategische Vorausschau ist ein vergleichsweise junges Forschungsfeld, das sich durch eine noch uneinheitliche Begrifflichkeit auszeichnet. Gemeinhin wird darunter jedoch die Fähigkeit verstanden, zukünftige Entwicklungen in dynamischen Umwelten frühzeitig zu antizipieren und aktiv mitzustalten [Cuh24], [WPV+21]. Sie umfasst eine Vielzahl von Praktiken, die Organisationen dabei unterstützen, relevante Veränderungen zu erkennen, zukunftsgerichtete Strategien zu entwickeln und innovative Handlungsoptionen zu erproben. Rohrbeck und Kum unterscheiden idealtypisch drei Phasen innerhalb des Prozesses [RK18]:

Wahrnehmen (Perceiving): Praktiken, die ein Unternehmen einsetzt, um die Faktoren zu identifizieren, die die Umwelt verändern. Unternehmen versuchen, (schwache) Signale vor der Konkurrenz zu erkennen, um einen Zeitvorsprung zu gewinnen.

Prospektion (Prospecting): Praktiken, mit denen Unternehmen ihre Sinne schärfen und Strategien entwickeln. Das Ziel dieser Phase ist es, einen Erkenntnisvorsprung zu erlangen, der es den Unternehmen ermöglicht, eine überlegene Handlungsweise zu identifizieren, die sich vom Status quo der Branche abhebt.

Sondieren (Probing): Praktiken, mit denen Unternehmen in die Erkundungsphase eintreten. Das Ziel von Sondierungspraktiken ist es, einen neuen Ansatz zu legitimieren bzw. einzuführen und sich damit einen Wettbewerbsvorsprung zu verschaffen.

Diese Definition wurde gewählt, da sie klare Bezugspunkte zur Forschung über dynamische Fähigkeiten aufweist, die den theoretischen Rahmen dieser Arbeit bilden. Die drei Phasen des strategischen Vorausschauprozesses lassen sich konzeptionell mit den zentralen Dimensionen dynamischer Fähigkeiten – Sensing, Seizing und Transforming [Tee07] – verknüpfen und ermöglichen somit eine konsistente theoretische Einbettung.

Der Einsatz von KI eröffnet neue Möglichkeiten zur Automatisierung, Skalierung und Präzisierung der strategischen Vorausschau [Jas24]. In dieser Arbeit wird die oben genannte Phasenstruktur nach Rohrbeck und Kum als konzeptionelle Grundlage verwendet, um den KI-Einsatz in den jeweiligen Prozessschritten zu verorten. Unter dem Begriff Künstliche Intelligenz werden dabei verschiedene Technologien subsumiert, die im Kontext strategischer Vorausschau komplementär eingesetzt werden können:

Topic Modelling: ermöglichen die automatisierte Erkennung von Trends und Mustern in umfangreichen Textkorpora und unterstützen damit die Phase des Wahrnehmens.

Retrieval-Augmented Generation (RAG): kombiniert Informationsabruf mit generativer KI, um strategische Optionen auf Basis aktueller Daten zu entwickeln – insbesondere relevant für die Prospektionsphase.

Large Language Models (LLMs): verarbeiten große Datenmengen und transformieren diese in strategisch verwertbare, sprachlich kohärente Beschreibungen. Sie finden Anwendung in allen Phasen, insbesondere aber bei der Generierung und Kommunikation von Erkenntnissen.

Die Kombination dieser Technologien ist in der strategischen Vorausschau üblich, da sie sich gegenseitig ergänzen und verstärken [FNK25], [KW24]. Auch in dieser Arbeit werden KI-Tools vorgestellt, die auf diesen Technologien basieren und exemplarisch den Mehrwert von KI in der strategischen Vorausschau verdeutlichen.

3 Theoretischer Bezug

Wie aus den bisherigen Ausführungen deutlich wird, stellt die strategische Vorausschau eine zentrale Schlüsselkompetenz für Unternehmen dar, um sich erfolgreich an Veränderungen in ihrem Umfeld anzupassen und zukünftige Entwicklungen frühzeitig zu antizipieren. Die Fähig-

keit, sich proaktiv mit wandelnden Umweltbedingungen auseinanderzusetzen, ist in der Unternehmensforschung eng mit dem Konzept der dynamischen Fähigkeiten verknüpft [Tee18]. Diese Theorie bietet einen Erklärungsrahmen dafür, wie Unternehmen durch gezielte organisationale Kompetenzen – sogenannte dynamische Fähigkeiten – Veränderungen nicht nur bewältigen, sondern aktiv gestalten können [HPD+12]. Dynamische Fähigkeiten werden dabei als organisationale Kompetenzen verstanden, die es Unternehmen ermöglichen, Chancen und Risiken frühzeitig zu erkennen, geeignete Maßnahmen zu ergreifen und ihre Ressourcen kontinuierlich neu zu konfigurieren [Tee07]. Das Zusammenspiel von strategischer Vorausschau und dynamischen Fähigkeiten zeigt sich insbesondere darin, dass Vorausschaupraktiken als konkrete Ausdrucksformen dynamischer Fähigkeiten fungieren und Unternehmen dadurch befähigen, nicht nur auf externe Impulse zu reagieren, sondern diese aktiv in strategische Vorteile zu transformieren.

Die drei Phasen der strategischen Vorausschau – Perceiving, Prospecting und Probing – spiegeln zentrale Elemente dynamischer Fähigkeiten wider, wie sie etwa von Teece et al. beschrieben wurden [Tee07], [TPS+97]. Das Erkennen von Chancen und Bedrohungen (Sensing), das Ergreifen von Maßnahmen (Seizing) und die kontinuierliche Re-Konfiguration von Ressourcen (Transforming). In der Phase des Perceiving wird die Umwelt systematisch beobachtet, um relevante Veränderungen frühzeitig zu identifizieren – ein Prozess, der eng mit der Sensing-Komponente dynamischer Fähigkeiten verknüpft ist. Prospecting entspricht dem strategischen Ausloten möglicher Handlungsoptionen und der Entwicklung zukunftsgerichteter Strategien, was dem seizing-Aspekt entspricht. Schließlich erlaubt Probing die experimentelle Erprobung und Implementierung neuer Ansätze, wodurch Unternehmen ihre Strukturen und Prozesse gezielt weiterentwickeln – ein Ausdruck der Transforming-Komponente. Strategische Vorausschau kann somit als ein operativer Ausdruck dynamischer Fähigkeiten verstanden werden, der Unternehmen befähigt, nicht nur auf Veränderungen zu reagieren, sondern diese aktiv mitzustalten [GLY+25].

Die zunehmende Komplexität unternehmerischer Entscheidungsprozesse sowie die immer kürzer werdenden Reaktionszeiten in dynamischen Märkten verlangen von Unternehmen eine steigige Beschleunigung ihrer Anpassungsfähigkeit [HL02]. Strategische Vorausschau und dynamische Fähigkeiten bilden dabei ein entscheidendes Fundament, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. In diesem Kontext gewinnt der Einsatz von KI-basierten Tools zunehmend an Bedeutung [FNK25]. Die Verbindung von menschlicher Expertise, strategischer Vorausschau und technologischer Unterstützung durch KI eröffnet Unternehmen neue Möglichkeiten, ihre dynamischen Fähigkeiten zu stärken und sich nachhaltig Wettbewerbsvorteile zu sichern [Jas24].

4 Methodisches Vorgehen

Diese Studie folgt einem qualitativen, explorativen Forschungsansatz mit dem Ziel, ein tieferes Verständnis für den Einsatz von Künstlicher Intelligenz in der strategischen Vorausschau von kleinen und mittleren Unternehmen zu gewinnen [Fri22]. Im Zentrum stehen dabei Fallstudien, die es ermöglichen, kontextspezifische Einblicke in unternehmerische Praktiken, Herausforderungen und Erfolgsfaktoren zu erhalten.

Die Auswahl der Fallstudien basiert auf dem Prinzip des theoretischen Samplings, wobei ein möglichst breites Spektrum an Anwendungskontexten und Erfahrungen beim Einsatz von Künstlicher Intelligenz in der strategischen Vorausschau abgebildet werden soll [Mer10]. Für die Analyse wurden zwei mittelständische Unternehmen herangezogen, die im Rahmen unabhängiger Forschungsprojekte bei der Entwicklung und Verfeinerung ihrer strategischen Vorausschaukompetenzen begleitet wurden.

Um kontrastierende Perspektiven zu erhalten, wurden die beiden Fallstudien gezielt so ausgewählt, dass sich die Unternehmen in wesentlichen Merkmalen unterscheiden [Akr14]. Dazu gehören insbesondere die Branchenzugehörigkeit, der Reifegrad im Umgang mit KI-Technologien und das Ausmaß der institutionalisierten strategischen Planungsprozesse. Diese bewusste Heterogenität ermöglicht es, unterschiedliche Ausgangsbedingungen, Herausforderungen und Entwicklungswege im Umgang mit KI-gestützter strategischer Vorausschau systematisch zu analysieren und zu vergleichen [TKV+11]. Das erste Unternehmen befindet sich in einem fortgeschrittenen Stadium der KI-Nutzung und verfügt über etablierte Prozesse zur strategischen Planung. Die Einführung eines KI-basierten Trendradars erfolgte im Rahmen eines strukturierten Transformationsprozesses, der durch interne Innovationsinitiativen flankiert wurde. Im Gegensatz dazu steht das zweite Unternehmen am Anfang seiner KI-Nutzung und verfolgt eine explorative Strategie zur Diversifizierung seines Angebots. Die strategische Planung ist hier weniger formalisiert und erfolgt projektbezogen. Diese Unterschiede in Reifegrad, Planungslogik und organisationaler Verankerung von KI ermöglichen eine kontrastreiche Analyse und liefern wertvolle Erkenntnisse über unterschiedliche Entwicklungswege im Umgang mit KI-gestützter strategischer Vorausschau.

Die erste Fallstudie befasst sich mit einem Unternehmen, das als Hersteller von Lüftungs-, Klima- und Heiztechnik für industrielle Anwendungen auf dem Markt tätig ist. Aufgrund veränderter Bedingungen hat sich das Unternehmen bewusst aus seinem angestammten Geschäftsfeld zurückgezogen und sich erfolgreich neue Tätigkeitsbereiche erschlossen. Zur Unterstützung dieses Transformationsprozesses wurde ein KI-basierter Trendradar eingesetzt. Dieses Tool ermöglicht die frühzeitige Identifizierung von technologischen Entwicklungen, so dass potenzielle Chancen rechtzeitig erkannt und strategisch genutzt werden können.

Die zweite Fallstudie befasst sich mit einem Unternehmen, das hochspezialisierte Systeme für die industrielle Reinigung entwickelt, produziert und vertreibt. Eine zentrale Herausforderung ist derzeit die strategische Diversifizierung des Lösungspotfolios. Angesichts der veränderten Anforderungen im Bereich der Nachhaltigkeit arbeitet das Unternehmen intensiv an der Weiterentwicklung seines Angebots und der Erschließung neuer Branchen und Märkte. Die Diversifizierungsstrategie des Unternehmens wurde gezielt durch eine KI-gestützte Analyse des vorhandenen Kompetenzprofils unterstützt. Im Rahmen dieser Analyse wurden die technologischen Stärken des Unternehmens systematisch erfasst und auf ihre Kompatibilität mit den Anforderungen potenzieller, bisher unbekannter Tätigkeitsfelder überprüft. Ziel war es, neue Anwendungsbereiche zu identifizieren, die sich sinnvoll mit dem bestehenden Leistungspotfolio verknüpfen lassen.

In beiden Fallstudien zeigt sich ein KI-gestützter Analyseansatz, der dem aktuellen Stand der Forschung entspricht und durch das koordinierte Zusammenspiel komplementärer Methoden

charakterisiert ist. Den Ausgangspunkt bildet das **Topic Modelling**, das aus umfangreichen und heterogenen Datenbeständen thematische Schwerpunkte extrahiert und inhaltliche Cluster bildet. Darauf aufbauend ermöglicht die Methode der **Retrieval-Augmented Generation** den gezielten Zugriff auf aktuelle, kontextbezogene Informationen zu den identifizierten Themenfeldern – beispielsweise aus wissenschaftlichen Publikationen, Nachrichtenquellen oder organisationsinternen Datenbanken. Im letzten Schritt werden diese Inhalte durch den Einsatz von **Large Language Models** verarbeitet und in strategisch verwertbare sowie sprachlich kohärente Trendbeschreibungen überführt. Die Datengrundlage für beide Fallstudien bilden ausgewählte Forschungsprojekte, die im Zeitraum von 2024 bis 2025 vom Joint Innovation Hub des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI durchgeführt wurden. Es werden Beobachtungen aus Workshops und Meetings, Dokumentenanalysen (z.B. Strategiedokumente, Projektberichte) und Interviews, die in den Projekten geführt wurden, herangezogen.

Der Analyseprozess wurde dokumentiert, um die Zuverlässigkeit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten (vgl. Bild 1). Das Ziel war auch, die Datenquellen zu triangulieren. Denn jede Datenquelle hat ihre eigenen Stärken und Schwächen. Die Triangulation macht es einfacher, systematische Verzerrungen in den einzelnen Quellen zu erkennen und auszugleichen. Darüber hinaus ergeben unterschiedliche Perspektiven auf denselben Sachverhalt ein vielschichtiges Bild.

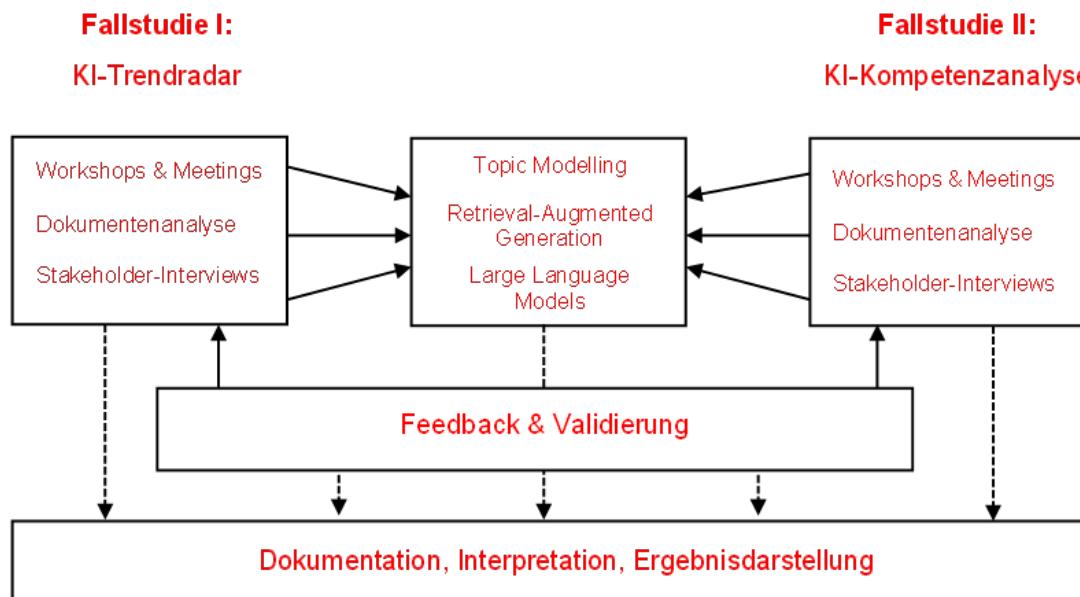


Bild 1: Darstellung des Forschungsprozesses

5 Ergebnisse der Fallstudie

Die Fallstudien in diesem Kapitel veranschaulichen anhand von Praxisbeispielen, wie KI-gestützte Instrumente effektiv in die strategische Vorausschau integriert werden können. Ziel ist es, den Mehrwert von KI-Anwendungen in den verschiedenen Phasen der strategischen Vorausschau aufzuzeigen und darzulegen, wie sie Unternehmen dabei unterstützen können, fundierte und zukunftsorientierte Entscheidungen zu treffen. Die Fallstudien in diesem Beitrag basieren auf der zuvor beschriebenen Kategorisierung und wurden gezielt ausgewählt, um die

verschiedenen Phasen des Innovationsprozesses – Perceiving, Prospecting und Probing – abzubilden (siehe Bild 2).

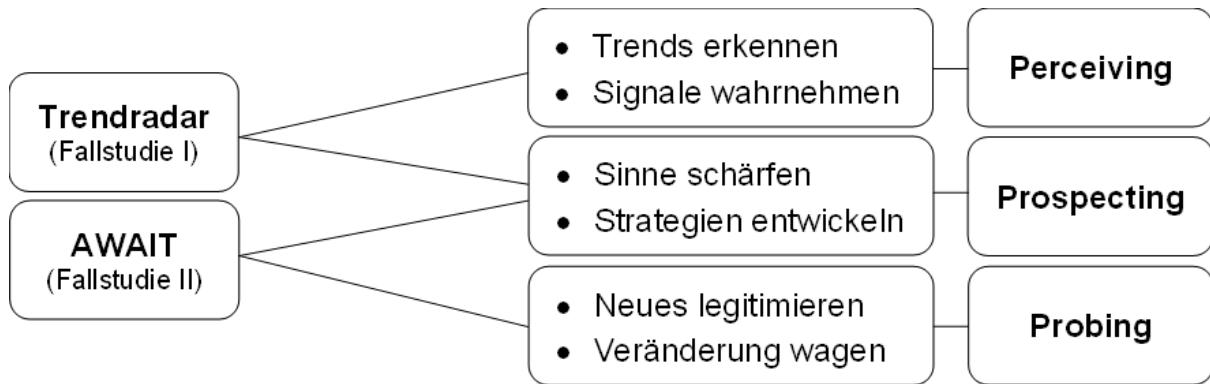


Bild 2: *KI-Tools in den Phasen der strategischen Vorausschau*

5.1 Erste Fallstudie: Trendradar

Beim ersten Anwendungsfall zielte das Unternehmen darauf ab, seine Fähigkeit zu stärken, technologische Trends frühzeitig zu erkennen und fundierte Entscheidungen darüber zu treffen, welche Entwicklungen in Zukunft für das eigene Geschäft relevant werden könnten. Dabei ging es insbesondere darum, schwache, frühe Signale zu erkennen – noch bevor sie von der breiten Masse der Wettbewerber wahrgenommen werden. Zur Umsetzung dieser Aufgabe wurde ein KI-gestützter Technologie- und Trendradar eingesetzt, der im Wesentlichen aus drei zentralen Komponenten besteht [JIH24]:

- 1) **Web Scraping und Inhaltsanalyse:** Dabei werden Unternehmenswebsites automatisch analysiert, um ein genaues Profil des Unternehmens zu erstellen.
- 2) **Datenanalyse:** Dazu werden umfangreiche Datenquellen wie wissenschaftliche Paper und Patente ausgewertet, um relevante Trends zu identifizieren und mit dem Unternehmensprofil zu vergleichen.
- 3) **Interaktive Präsentation der Ergebnisse:** Die Ergebnisse werden in einer benutzerfreundlichen Oberfläche visualisiert und durch konkrete Handlungsempfehlungen ergänzt.

Der Einsatz des Trendradars hatte eine Reihe positiver Auswirkungen. Einerseits lieferte das Tool wertvolle Informationen über technologische Entwicklungen, die für das Unternehmen von hoher Relevanz waren. Es half dabei, Trends zu identifizieren und frühe Marktsignale zu erkennen. Gleichzeitig zeigte sich, dass die KI-gestützte Analyse das Denken über bestehende Routinen hinaus fördern kann [SSW+25]. Durch die algorithmische Auswertung umfangreicher Datenbestände wurden unternehmensrelevante Trends identifiziert, die zuvor nicht im Fokus der Mitarbeitenden lagen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass strategische Suchprozesse in Organisationen häufig pfadabhängig verlaufen und stark von etablierten Strukturen sowie kognitiven Routinen geprägt sind. Der Einsatz von KI ermöglichte es, diese begrenzten Perspektiven zu überwinden und neue, bislang unbeachtete Entwicklungspotenziale sichtbar zu machen. Die Analyse trug somit dazu bei, bestehende Entscheidungsmuster im Unternehmen zu hinterfragen und neue Sichtweisen zu ermöglichen. Die Verwendung des Trendradars brachte auch

Herausforderungen ans Licht. KI-Tools agieren oft als „Black Boxes“ – ihre Entscheidungsprozesse und Empfehlungen lassen sich daher nur schwer nachvollziehen. Daraus können sich erheblich Vertrauensprobleme für die Entscheidungsträger ergeben. Um die Akzeptanz des Tools innerhalb des Unternehmens zu erhöhen, wurden spezielle Maßnahmen ergriffen: So wurde die Funktionsweise des Trendradars anhand von interaktiven Demonstrationen veranschaulicht und die Mitarbeiter wurden aktiv in die Zwischenschritte der Analyse einbezogen. Darüber hinaus stärkten regelmäßige Validierungen durch Mitarbeiter des Unternehmens das Vertrauen in die Ergebnisse und erhöhten die Nachvollziehbarkeit.

5.2 Zweite Fallstudie: AWAIT

Im zweiten Anwendungsfall wurde ein Unternehmen dabei unterstützt, seine Diversifizierungsstrategien zielgerichtet zu fördern. Um erfolgreich in neue Geschäftsbereiche und Märkte expandieren zu können, mussten auf der Grundlage des bestehenden Leistungsportfolios potenzielle Anknüpfungspunkte identifiziert und die für die Erschließung neuer Märkte noch zu entwickelnden Kompetenzen ermittelt werden. Dazu wurde das AWAIT-Tool verwendet, was für Automated Website Analysis for Innovative Technologies steht [JIH24].

AWAIT ermöglicht eine umfassende Bewertung der technologischen Kompetenz eines Unternehmens, indem es den Inhalt seiner Website analysiert und mithilfe von KI sein technologisches Know-how bewertet. Das Tool ermittelt außerdem, wie sich das betreffende Unternehmen in Bezug auf bestimmte Technologien positioniert, über welche technologischen Fähigkeiten es verfügt und wo es Kompetenzlücken gibt. Die Ergebnisse werden dann mithilfe von generativer KI detailliert und verständlich dargestellt.

Durch den Einsatz von AWAIT war das Unternehmen in der Lage, seine technologischen Stärken systematisch zu identifizieren und ihre Kompatibilität mit den Anforderungen potenzieller, bisher unbekannter Tätigkeitsfelder zu überprüfen. So konnten neue Anwendungsbereiche identifiziert werden, die sich sinnvoll mit dem bestehenden Portfolio verknüpfen lassen. Auch die Websites der wichtigsten Wettbewerber wurden in die Analyse einbezogen. Dabei wurden Informationen über Produktangebote, technologische Entwicklungen, Marktpositionierung und strategische Initiativen gesammelt. Diese umfassende Wettbewerbsanalyse lieferte wertvolle Einblicke in die Marktlandschaft und half, Chancen und Lücken für das Unternehmen zu identifizieren. Zudem wurde eine KI-gestützte semantische Suche eingesetzt, um relevante Schlüsselwörter und Phrasen im Zusammenhang mit den Technologien des Unternehmens zu identifizieren. Diese Analyse lieferte ein ganzheitliches Bild davon, wo und wie die vorhandenen Fähigkeiten und Technologien sinnvoll eingesetzt werden können.

Insgesamt hat der Einsatz von KI vielversprechende Anwendungsbereiche jenseits des traditionellen Branchenfokus identifiziert. Wie schon in der ersten Fallstudie deutlich wurde, ermöglicht der Einsatz von KI den Unternehmen, sich von internen Denkmustern zu lösen [SSW+25]. Denn die maschinelle Analyse unterliegt nicht den spezifischen kulturellen Prägungen und Vorurteilen einzelner Organisationen. Allerdings können auch KI-Systeme Verzerrungen aufweisen, die aus den zugrunde liegenden Trainingsdaten resultieren. Die Unterstützung durch KI kann Unternehmen dabei helfen, neue Perspektiven einzunehmen – sofern mögliche Verzerrungen in der Technologie berücksichtigt werden. [HDE+42]. Die Analyse half zudem, eine

gute Schnittmenge zwischen den Anforderungen der neuen Märkte und den bestehenden Fähigkeiten und Lösungen des Unternehmens zu finden. Damit wurde nicht nur eine solide Basis für eine weitere Diversifizierung geschaffen, sondern auch eine datenbasierte Legitimation für strategische Entscheidungen. Der datengetriebene Ansatz fördert daher nicht nur die Innovationsfähigkeit, sondern stärkt auch die strategische Widerstandsfähigkeit des Unternehmens gegenüber Marktveränderungen [EBS+25]. Gleichzeitig eröffnet er neue Möglichkeiten für die Positionierung in bisher ungenutzten Geschäftsbereichen.

6 Diskussion

Die analysierten Fallstudien veranschaulichen, dass KI-gestützte Tools einen wertvollen Beitrag zur strategischen Vorausschau leisten können. Unsere phasenbasierte Analyse zeigt, dass der Einsatz solcher Werkzeuge nicht nur die frühzeitige Erkennung von Trends (Perceiving) unterstützt und das Bewusstsein für neue Chancen (Prospecting) fördert, sondern auch eine zentrale Rolle bei der Erkundung und Legitimierung neuer strategischer Optionen (Probing) spielen kann.

Die Fallanalysen veranschaulichen zudem die Vielfalt der möglichen Anwendungen von KI in der strategischen Vorausschau, darunter:

- **Automatisierte Markt- und Trendbeobachtung:** KI kann große Datenmengen aus Nachrichtenquellen, sozialen Medien, Patenten, wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Websites von Wettbewerbern analysieren.
- **Frühzeitige Erkennung von Veränderungen:** Durch Mustererkennung kann KI frühzeitig technologische Entwicklungen, veränderte Kundenbedürfnisse und Marktverschiebungen erkennen.
- **Technologie-Markt-Fit-Analyse:** KI-Tools können prüfen, welche Technologien mit welchen Märkten und Betätigungsfeldern kompatibel sind.
- **Benchmarking:** KI kann auf der Grundlage öffentlich verfügbarer Daten einen Vergleich mit Wettbewerbern durchführen und so helfen, Differenzierungs- und Entwicklungspotenziale zu identifizieren.
- **Datenbasierte Entscheidungsfindung:** Der Einsatz von KI kann helfen, objektive Argumente für strategische Managemententscheidungen zu liefern.
- **Visuelle Aufbereitung von komplexen Daten:** KI kann umfangreiche Analysen in übersichtliche Dashboards und interaktive Berichte übersetzen, die für alle Interessensgruppen die Relevanz und Machbarkeit neuer Ideen nachvollziehbar darstellen.

Ein wichtiger Aspekt, der sich aus beiden Fallstudien ableiten lässt, ist darüber hinaus die Bedeutung der menschlichen Beteiligung an KI-gestützten Prozessen. Trotz der hohen Leistungsfähigkeit der eingesetzten Tools bleibt die Interpretation der Ergebnisse und die Ableitung strategischer Maßnahmen eine Aufgabe, die stark von der Erfahrung und dem Urteilsvermögen der Mitarbeiter abhängt. Die Kombination aus datenbasierter Analyse und menschlicher Expertise erweist sich daher als entscheidender Erfolgsfaktor für die strategische Vorausschau. Nur wenn beide Elemente sinnvoll integriert sind, kann das volle Potenzial der KI bei der strategischen Entscheidungsfindung ausgeschöpft werden.

6.1 Chancen und Risiken für KMU

Die in den Fallstudien dargestellten Anwendungen KI-gestützter Analysewerkzeuge verdeutlichen exemplarisch das strategische Potenzial solcher Technologien für KMU. Der Einsatz eines Technologie- und Trendradars ermöglichte die frühzeitige Identifikation relevanter technologischer Entwicklungen und die Ableitung innovationsbezogener Handlungsoptionen. Die Anwendung automatisierter Kompetenzanalysen, wie sie im Rahmen des AWAIT-Tools erfolgte, unterstützte darüber hinaus die systematische Erschließung neuer Geschäftsfelder durch die Bewertung bestehender Fähigkeiten und die Identifikation von Kompetenzlücken. Beide Beispiele zeigen, dass KI nicht nur als operative Unterstützung fungiert, sondern auch als Katalysator für strategisches Umdenken innerhalb von Organisationen. Für KMU ergibt sich daraus die Möglichkeit, trotz begrenzter Ressourcen evidenzbasierte Entscheidungen zu treffen und ihre strategische Positionierung datengetrieben weiterzuentwickeln – vorausgesetzt, die Implementierung erfolgt unter Berücksichtigung der organisationsspezifischen Rahmenbedingungen sowie der technologischen und kulturellen Herausforderungen.

Der Einsatz von künstlicher Intelligenz kann dabei nicht nur Orientierung bieten, sondern wie eingangs skizziert auch Überzeugungskraft entwickeln, was ein entscheidender Faktor für die Legitimation und Umsetzung von strategischen Innovationen ist [LAF+24]. Dies ist besonders wichtig für KMU. Denn aufgrund begrenzter finanzieller und personeller Ressourcen müssen in KMU strategische Entscheidungen – wie z.B. Diversifizierung oder Markterweiterung – besonders gut begründet werden. Datenbasierte Argumente helfen dabei, interne Zustimmung zu erhalten und externes Vertrauen zu gewinnen, z.B. bei Kreditinstituten, Fördereinrichtungen oder Kooperationspartnern [DG21]. Hier bietet KI einen klaren Mehrwert, indem sie dazu beiträgt, Risiken zu minimieren und Entscheidungen zu begründen [Kon23].

Außerdem verfügen KMU oft nicht über eigene Marktforschungsabteilungen. KI-gestützte Tools können diese Lücke schließen, indem sie automatisch Markttrends, Wettbewerbsbewegungen und Kundenbedürfnisse analysieren. Das schafft strategische Orientierung im Unternehmen, selbst wenn kein großes Forschungsbudget zur Verfügung steht [GGH+25]. Dabei ist es gerade für KMUs entscheidend, Nischen frühzeitig zu erkennen und gezielt zu besetzen. Hier kann KI helfen, bisher unentdeckte Potenziale zu identifizieren und neue Geschäftsfelder zu legitimieren – zum Beispiel durch Technologie-Fit-Analysen oder Wettbewerbsvergleiche.

Darüber hinaus sind strategische Veränderungen in KMU oft eng mit der Management- oder Eigentümerstruktur verknüpft. Neue Ideen müssen daher nicht nur intern entwickelt, sondern auch überzeugend kommuniziert und legitimiert werden. KI-gestützte Visualisierungen und Szenarien können dafür komplexe Zusammenhänge greifbar machen und so die Akzeptanz bei Mitarbeitern und Entscheidungsträgern deutlich erhöhen [EBS+25].

Obwohl der Einsatz von künstlicher Intelligenz viele Chancen für KMU bietet, bringt er auch eine Reihe von Herausforderungen und potenziellen Problemen mit sich. Zum Beispiel verfügen viele KMU nicht über das notwendige Fachwissen, um KI-Systeme eigenständig auszuwählen, zu implementieren und zu betreiben [LAF+24]. Es besteht daher die Gefahr, dass KMU von proprietären KI-Plattformen abhängig werden, insbesondere wenn Daten oder Modelle nicht portabel sind [Oec23]. Bei Cloud-Lösungen besteht zudem die Gefahr, dass sensible Unternehmensdaten außerhalb der Kontrolle des Unternehmens verarbeitet werden [AH21]. Ohne

einen begleitenden Kulturwandel kann KI außerdem auf Skepsis oder Widerstand in der Belegschaft stoßen. Die Implementierung von KI in der strategischen Vorausschau erfordert daher einen Wandel im Mindset der Organisation.

Aus theoretischer Perspektive lassen sich die beschriebenen KI-Anwendungen als Ausdruck dynamischer Fähigkeiten interpretieren. Die Fähigkeit kleiner und mittlerer Unternehmen, externe Veränderungen frühzeitig zu erkennen (Sensing), geeignete Maßnahmen zu ergreifen (Seizing) und ihre Ressourcen flexibel zu re-konfigurieren (Transforming), wird durch den gezielten Einsatz von KI-Technologien maßgeblich gestärkt [Teee07]. Der Technologie- und Trendradar unterstützt insbesondere die Sensing-Komponente, indem er schwache Signale aus dem Unternehmensumfeld identifiziert und analysiert. Das AWAIT-Tool hingegen fördert die Seizing-Komponente, indem es strategische Handlungsoptionen aufzeigt und Kompetenzlücken sichtbar macht. Beide Werkzeuge tragen darüber hinaus zur Stärkung der Transforming-Fähigkeit bei, indem sie datenbasierte Entscheidungsgrundlagen für die Anpassung und Weiterentwicklung organisationaler Strukturen liefern. Gerade für KMU, die häufig unter begrenzten Ressourcen operieren, eröffnet die Verbindung von KI-Technologien mit dem Konzept dynamischer Fähigkeiten eine vielversprechende Möglichkeit, ihre strategische Resilienz zu erhöhen und sich proaktiv in dynamischen Märkten zu positionieren.

6.2 Wettbewerbsfähigkeit und neue Rollenverständnisse

Der gezielte Einsatz von KI-Technologien kann die Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittlerer Unternehmen auf mehreren Ebenen stärken. Durch die automatisierte Analyse großer Datens Mengen – etwa zu Markttrends, Kundenbedürfnissen oder technologischen Entwicklungen – erhalten Unternehmen Zugang zu strategisch relevanten Informationen, die ihnen sonst aufgrund begrenzter Ressourcen verwehrt blieben. Dies ermöglicht eine präzisere Positionierung am Markt, eine schnellere Reaktion auf Veränderungen und die frühzeitige Erkennung von Chancen in Nischenmärkten. KI-gestützte Tools wie Trendradare oder Kompetenzanalysen liefern datenbasierte Entscheidungsgrundlagen, die strategische Maßnahmen wie Diversifizierung, Partnerschaften oder Produktinnovationen fundiert legitimieren. So entstehen belastbare Strategien, die nicht nur reaktiv, sondern proaktiv auf Marktveränderungen eingehen.

Gleichzeitig verändert der Einsatz von KI auch die Rolle der Mitarbeitenden innerhalb der Organisation. Anstatt lediglich operative Aufgaben auszuführen, werden Mitarbeitende zunehmend zu strategischen Mitgestaltern. KI-Systeme übernehmen repetitive Analyseprozesse, wodurch Freiräume für kreative, konzeptionelle und strategische Tätigkeiten entstehen. Die Interpretation von KI-Ergebnissen, die Ableitung von Handlungsempfehlungen und die Kommunikation komplexer Zusammenhänge erfordern ein hohes Maß an Fachwissen, Urteilsvermögen und interdisziplinärer Zusammenarbeit. Mitarbeitende werden somit nicht ersetzt, sondern in ihrer Rolle aufgewertet – insbesondere, wenn sie aktiv in die Entwicklung, Validierung und Anwendung der KI-Systeme eingebunden werden.

Damit KI ihr volles strategisches Potenzial entfalten kann, ist eine gezielte Kompetenzentwicklung im Unternehmen notwendig. Schulungen, interaktive Demonstrationen und partizipative Implementierungsprozesse fördern nicht nur das Verständnis für KI, sondern auch die Akzeptanz und das Vertrauen in deren Ergebnisse. So entsteht ein organisationales Umfeld, in dem

technologische Innovation und menschliche Expertise sich gegenseitig verstärken – ein entscheidender Faktor für die nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit von KMU.

7 Fazit

Die Analyse der Fallstudien zeigt, dass KI einen wesentlichen Beitrag zur strategischen Vorausschau leisten kann. Gerade für KMU eröffnet der Einsatz von KI neue Möglichkeiten, strategische Entscheidungen datenbasiert abzusichern, die interne Zustimmung zu fördern und die externe Legitimation zu stärken. KI kann fehlende Marktforschungskapazitäten kompensieren, unentdeckte Potenziale aufdecken und komplexe Zusammenhänge verständlich visualisieren, was gerade in Unternehmen mit begrenzten Ressourcen ein entscheidender Vorteil ist. Zugleich dürfen die Herausforderungen nicht unterschätzt werden: Technologische Komplexität, mangelndes Fachwissen, Datenschutzfragen und kulturelle Barrieren stellen echte Hürden dar. Der erfolgreiche Einsatz von KI in der strategischen Vorausschau erfordert daher nicht nur technologische Investitionen, sondern auch einen begleitenden Wandel in der Denkweise und Unternehmenskultur.

Trotz der vielversprechenden Ergebnisse dieser Studie sind einige Limitationen zu beachten, die die Generalisierbarkeit und Aussagekraft der Erkenntnisse einschränken. Die Untersuchung basiert auf einer begrenzten Anzahl von Fallstudien, die zwar bewusst kontrastierend gewählt wurden, jedoch keine vollständige Repräsentativität für die Vielfalt von KMU gewährleisten. Zudem wurden die Daten primär qualitativ erhoben, was eine tiefgehende Kontextanalyse ermöglicht, jedoch keine quantitativen Aussagen über die Wirksamkeit oder Effizienz der eingesetzten KI-Tools zulässt. Die Bewertung der KI-Anwendungen ist stark abhängig von der subjektiven Einschätzung der beteiligten Stakeholder, was potenzielle Verzerrungen durch individuelle Erfahrungen oder organisationale Kulturen mit sich bringen kann.

Für zukünftige Forschung ergeben sich daraus mehrere vielversprechende Ansatzpunkte. Eine systematische Erweiterung der Fallstudienbasis – etwa durch Einbeziehung weiterer Branchen, Unternehmensgrößen oder internationaler Kontexte – könnte helfen, die Übertragbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Auch eine Kombination qualitativer und quantitativer Methoden wäre sinnvoll, um sowohl die Tiefe als auch die Breite der Analyse zu verbessern. Besonders relevant sind dabei experimentelle Designs oder Längsschnittstudien, der Aufschluss darüber geben, wie sich der Einsatz von KI-gestützten Vorausschauinstrumenten langfristig auf die strategische Resilienz und Innovationsfähigkeit von Unternehmen auswirkt.

Ein weiterer Forschungsstrang könnte sich mit der interdisziplinären Integration von KI und menschlicher Expertise befassen. Hier stellt sich die Frage, wie hybride Entscheidungsprozesse gestaltet werden können, in denen algorithmische Analysen und menschliches Urteilsvermögen optimal zusammenspielen. Auch die ethischen, rechtlichen und kulturellen Implikationen des KI-Einsatzes in strategischen Kontexten verdienen vertiefte Aufmerksamkeit – insbesondere im Hinblick auf Transparenz, Vertrauen und Akzeptanz in Organisationen.

Literatur

[AH21] AXMANN, B.; HARMOKO, H.: Herausforderungen bei der Einführung neuer digitaler Technologien bei KMU – Teil 1: Am Beispiel der Künstlichen Intelligenz. *ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Vol. 116, Nr. 7-8, 2021, S. 457–460

[Akr14] AKREMI, L.: Stichprobenziehung in der qualitativen Sozialforschung. In: BAUR, N., BLASIUS, J. (Hrsg.) *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*, Springer VS, Wiesbaden, 2014

[BD23] BUSCH, M.; DUWE, D.: *Artificial intelligence in innovation processes – A Study Using the Example of an Innovation Research Institute*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, 2023

[Bit24] BITKOM: Künstliche Intelligenz in Deutschland: Perspektiven aus Bevölkerung & Unternehmen. Bitkom Research, 2024

[BM21] BRANDTNER, P.; MATES, M.: Artificial Intelligence in Strategic Foresight – Current Practices and Future Application Potentials: Current Practices and Future Application Potentials. In *Proceedings of the 12th International Conference on E-business, Management and Economics (ICEME '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2021, S. 75–81

[CDF+25] CARAYANNIS, E. G., DUMITRESCU, R.; FALKOWSKI, T.; PAPAMICHAIL, G.; ZOTA, N. R.: Enhancing SME Resilience Through Artificial Intelligence and Strategic Foresight: A Framework for Sustainable Competitiveness. *Technology in Society*, Vol. 81, 102835, 2025

[CPZ+25] CARAYANNIS, E. G.; PAPAMICHAIL, G.; ZOTAS, N.; ET AL.: Corporate Foresight: Navigating Uncertainty in a VUCA World. *Journal of the Knowledge Economy*, 2025

[Cuh24] CUHLS, K.: Foresight statt Prognosen – gestalten statt vorherzusagen. In: WINK, M.; NÜNNING, V. (Hrsg.) *Prognosen in der Wissenschaft*. Heidelberger Jahrbücher Online, Bd. 9, 2024, S. 45–60

[DG21] DEMARY, V.; GOECKE, H.: Wie KMU Künstliche Intelligenz nutzen. Institut der deutschen Wirtschaft, IW-Kurzbericht, Nr. 81, 2021

[EBS+25] ESTEVEZ, M.; BALLESTAR, M. T.; SAINZ, J.: A Primer on Out-of-the-Box AI Marketing Mix Models. *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 72, 2025, S. 282–294

[Fri22] FRIEDRICH, A.: Forschungsdesign und -methoden: Qualitative Fallstudie. In: *Umstrittener Untergrund*, S. 63–83, Springer, 2022

[FS16] FINK, A.; SIEBE, A.: *Szenario-Management: Von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrobusten Entscheidungen*. Campus Verlag, 2016

[FTJ+23] FISCHER, D. V.; TRANAES, J. S.; JUNG, H.: KI in der Vorausschau – Kritische Evaluation der Anwendung von generativer KI am Beispiel von ChatGPT in der Szenario-Technik. In: DUMITRESCU, R.; HÖLZLE, K. (Hrsg.) *Vorausschau und Technologieplanung*. Heinz-Nixdorf-Institut, Universität Paderborn, Paderborn, 2023, S. 227–254.

[FNK25] FITKOV-NORRIS, E.; KOCHEGA, N.: 14: Leveraging AI for strategic foresight: Unveiling future horizons. In: *Improving and Enhancing Scenario Planning*. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing, 2025

[GLY+25] GAO, Y., LIU, S., YANG, L.: Artificial intelligence and innovation capability: A dynamic capabilities perspective. *International Review of Economics & Finance*, Vol. 98, 2025, 103923

[GGH+25] GRÜNEKE, T.; GUGGENBERGER, T.; HALL, K.; LANGER, T.; MEIERHÖFER, S.; OBERLÄNDER, A. M.; RÖGLINGER, M.; STRAMM, J.; URBACH, N.; WOZAR, J.: Einsatz- und Akzeptanzanalyse von KI-basierten Wissenszugängen in KMU am Beispiel einer semantischen Suche. Universität Bayreuth, Frankfurt University of Applied Sciences, Whitepaper, 2025

[GGW+22] GEURTS, A.; GUTKNECHT, R.; WARNEKE, P.; GOETHEER, A.; SCHIRRMEITER, E.; BAKER, B.; MEISSNER, S.: New Perspectives for Data-Supported Foresight: The Hybrid AI-Expert Approach. *Futures & Foresight Science*, 4, 2022, e99

[HDE+24] HAO, X.; DEMIR, E.; EYERS, D.: Exploring Collaborative Decision-Making: A Quasi-Experimental Study of Human and Generative AI Interaction. *Technology in Society*, Vol. 78, 2024, 102662

[HL02] HAARHAUS, T.; LIENING, A.: Building dynamic capabilities to cope with environmental uncertainty: The role of strategic foresight. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 155, 2020, 120033

[Has25] HASSEN, M.: Beyond the algorithm: applying critical lenses to AI governance and societal change. *AI Ethics*, 2025)

[HPD+12] HUSSLER, C.; PÉNIN, J.; DIETRICH, M.; ET AL.: How to concretize dynamic capabilities? Theory and examples. *Journal of Strategy and Management*, Vol. 5, Nr. 4, 2012, S. 381–392

[Jas24] JASSEM, S.: Artificial Intelligence in Accounting Practices in the Industry 5.0 Era from a Dynamic Capabilities Perspective: Role of Strategic Foresight, Agility, and Flexibility. In: Opportunities and Risks in AI for Business Development. *Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 545. Springer, Cham, 2024

[JIH24] JOINT INNOVATION HUB: Künstliche Intelligenz in der Anwendung: Aktuelle KI-Demonstratoren am Joint Innovation Hub. Blog, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, 2024

[KKD+23] KÖDDING, P.; KOLDEWEY, C.; DUMITRESCU, R.: Scenario-Based Foresight in the Age of Digital Technologies and AI. In: SHAJEK, A., HARTMANN, E. A. (Hrsg.) *New Digital Work*. Springer, Cham, 2023

[Kon23] KONRAD-ADENAUER-STIFTUNG: KI in KMU: Daten nutzen und teilen. 2023

[KS23] KIM, J.-S.; SEO, D.: Foresight and Strategic Decision-Making Framework From Artificial Intelligence Technology Development to Utilization Activities in Small-And-Medium-Sized Enterprises. *Foresight*, Vol. 25, No. 6, 2023, S. 769–787

[KW24] KUMAR, D.; WEISSENBERGER-EIBL, M.: Artificial Intelligence Driven Trend Forecasting: Integrating BERT Topic Modelling and Generative Artificial Intelligence for Semantic Insights. *R&D Management Conference*, Stockholm, KTH Royal Institute of Technology, 2024

[LAF+24] LUDWIG, T.; AZABAL, N.; FRIES, M.; NIEßNER, J.; ELSHOLZ, U.; LÜTZENKIRCHEN, S.; THOMAS, M.; SCHRÖDER, L.: KI-Kompetenzen in der Praxis: Eine Analyse deutscher KMUs. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, Vol. 61, Nr. 2, 2024, S. 100–113

[Mer10] MERKENS, H.: Auswahlverfahren, Sampling, Fallkonstruktion. In: FLICK, U.; VON KARDORFF, E.; STEINKE, I. (Hrsg.) *Qualitative Forschung: Ein Handbuch*, S. 286–297, Rowohlt, 2010

[Mic19] MIETZNER, D.: Szenarioanalyse als Instrument der strategischen Vorausschau: Ein Open-Foresight-Ansatz. Springer Gabler, 2019

[Oec23] OECD. (2023). Künstliche Intelligenz in Deutschland – Chancen und Herausforderungen für KMU. OECD Publishing. <https://digitalzentrum-berlin.de/digitalisierung-im-mittelstand-vier-aktuelle-studien>

[Per24] PÉREZ-ORTIZ, M.: From Prediction to Foresight: The Role of AI in Designing Responsible Futures. *Journal of Artificial Intelligence for Sustainable Development*, Vol. 1, Nr., 2024, S. 1–9

[RK18] ROHRBECK, R.; KUM, M. E.: Corporate Foresight and Its Impact on Firm Performance: A Longitudinal Analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 129, 2018, S. 105–116

[RNL+23] ROZANEC, J.; NEMEC, P.; LEBAN, G.; GROBELNIK, M.: AI, What Does the Future Hold for Us? Automating Strategic Foresight. In *Companion of the 2023 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering (ICPE '23 Companion)*. Association for Computing Machinery, New York, (NY) USA, 2023, S. 247–248

[SPK+24] SCHWAEKE, J.; PETERS, A.; KANBACH, D. K.; KRAUS, S.; JONES, P. The New Normal: The Status Quo of AI Adoption in SMEs. *Journal of Small Business Management*, Vol. 63, Nr. 3, 2024, S. 1297–1331

[SSW+25] SCHWARZ, J. O.; SCHROPP, T. C.; WACH, B.; BUDER, F.: Do Internal Foresight Activities Add Value to Decision-Making? Insights From an Empirical Investigation. *Futures*, Vol. 166, 2025, 103548

[SWM+19] SCHÜLE, S.; WOHLFART, L.; MASIOR, J.: Strategische Vorausschau mit Szenarien. In: ABELE, T. (Hrsg.) Fallstudien zum Technologie- & Innovationsmanagement, FOM-Edition, Springer Gabler, Wiesbaden, 2019

[Tee18] TEECE, D. J.: Dynamic capabilities as (workable) management systems theory. *Journal of Management & Organization*, Vol. 24, Nr. 3, 2018, S. 359–368

[Tee07] TEECE, D. J.: Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal*, Vol. 28, 2007, S. 1319–1350

[TPS+97] TEECE, D. J.; PISANO, G.; SHUEN, A.: Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, Vol. 18, 1997, S. 509–533

[TKV+11] TRUSCHKAT, I.; KAISER-BELZ, M.; VOLKMANN, V.: Theoretisches Sampling in Qualifikationsarbeiten: Die Grounded-Theory-Methodologie zwischen Programmatik und Forschungspraxis. In: MEY, G.; MRUCK, K. (Hrsg.) *Grounded Theory Reader*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2011

[VK22] VON DER GRACHT, H.; KISGEN, S.: Methoden der strategischen Vorausschau. *Management der Zukunft*, SIBE-Edition, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2022

[WPV+21] WARNKE, P.; PRIEBE, M.; VEIT, S.: Studie zur Institutionalisierung von Strategischer Vorausschau als Prozess und Methode in der deutschen Bundesregierung. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, 2021

Autoren

Dr. Malte Busch ist seit 2019 am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI in Karlsruhe und Teamleiter des Joint Innovation Hub in Heilbronn. Nach einem Master-Abschluss in International Management an der Strathclyde University Business School in Glasgow promovierte Herr Busch an der Coventry University zum Thema Stakeholdereinfluss und Corporate Social Responsibility in der Automobilindustrie. Herr Busch beschäftigt sich seit vielen Jahren mit Organisationsstrategien, Stakeholder-Management sowie Innovationsmanagement und unterstützt mittelständische Unternehmen im Transformationsprozess. Er lehrt „Transformation durch Innovation“ am Karlsruher Institut für Technologie und „Strategic Management“ im MBA-Programm der Hochschule Ludwigshafen.

Deepak Kumar ist ein IT-Experte im Joint Innovation Hub Heilbronn am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Herr Kumar hat einen Master-Abschluss vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in den Bereichen Elektrotechnik und Informationstechnik. Herr Kumar sammelte während seiner akademischen Laufbahn wertvolle Erfahrungen im Student Innovation Lab am Karlsruher Institut für Technologie, wo er sich mit Nachhaltigkeit und Digitalisierung befasste. Er war auch aktiv am Fraunhofer IOSB beteiligt, wo er seine Masterarbeit schrieb. Im Rahmen dieser Arbeit entwickelte er ein KI-Tool, das einem Partner aus der deutschen Automobilindustrie bei der Bewältigung von Herausforderungen in der Fertigung helfen sollte.

Bhavesh Jain studierte Informatik an der JNTUH in Indien und arbeitete während seines Studiums für Amazon India in der Analyseabteilung. Anschließend absolvierte er einen Master in Data Science an der Universität Paderborn. In dieser Zeit arbeitete er am Fraunhofer IML und bei SAP, wo er umfangreiche Erfahrungen im Bereich der künstlichen Intelligenz, insbesondere in den Bereichen maschinelles Lernen, natürliche Sprachverarbeitung und Prognose, sammelte.

Heute arbeitet Herr Jain am Joint Innovation Hub in Heilbronn als Experte für die Weiterentwicklung innovativer Lösungen.

Dr. Johann Valentowitsch studierte internationale Volkswirtschaftslehre an der Universität Regensburg und promovierte am Betriebswirtschaftlichen Institut der Universität Stuttgart. Nach seiner Promotion forschte er als akademischer Rat am Lehrstuhl für Innovations- und Dienstleistungsmanagement in Stuttgart. Derzeit ist er am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung IS tätig. Im Joint Innovation Hub in Heilbronn widmet er sich vorrangig den Themen digitale Transformation, Gestaltung von Innovationsökosystemen sowie strategische Vorausschau.

David Wurster studierte Mechatronik an der Dualen Hochschule Mannheim und absolvierte anschließend ein berufsbegleitendes Masterstudium an der FOM Stuttgart mit den Schwerpunkten Business Consulting und Digital Management. Von September 2019 bis August 2022 arbeitete er als IT- und Unternehmensberater bei einer internationalen Top-Tier-Beratungsfirma. Dadurch verfügt er über umfassende Expertise in der Entwicklung und Implementierung neuer Softwareanwendungen. Von September 2022 bis Juni 2024 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Soziologie der Technik und Innovation, Simulationsmethoden an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, wo er schwerpunktmäßig im Projekt AI-FORA tätig war. Seit Juli 2024 wirkt David Wurster als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Joint Innovation Hub des Fraunhofer ISI.

Kollaborative Mensch-KI-Interaktion für datengestützte Vorausschau: Ein Human-in-the-Loop-Ansatz zum Trendmonitoring im Bereich Quantencomputing

Felix Bickert¹, Moritz Maier¹, Simone Kaiser¹, Katharina Hözle²

¹ Fraunhofer IAO, Center for Responsible Research and Innovation CeRRI,
felix.bickert@iao.fraunhofer.de, moritz-julian.maier@iao.fraunhofer.de,
simone.kaiser@iao.fraunhofer.de

² Fraunhofer IAO, katharina.hoelzle@iao.fraunhofer.de

Zusammenfassung

Bisherige Ansätze der Trendanalyse stoßen angesichts der wachsenden Datenmengen sowie der Dynamik und Komplexität im Bereich Deep Tech schnell an ihre Grenzen, sobald ein hoher Anteil an manueller Datenexploration und Mustererkennung erforderlich ist. Kollaborative Mensch-KI-Interaktion stellt eine Möglichkeit dar, qualitative Trend-Expertise mit quantitativen Data-Mining-Methoden zu kombinieren und so frühzeitig schwache Signale und emergente Trends systematisch und zeiteffizient zu identifizieren. Dieser Beitrag untersucht, wie das transformative Potenzial von Künstlicher Intelligenz (KI) für Methoden der Zukunftsforschung genutzt werden kann und stellt einen praxisorientierten, kollaborativen Human-in-the-Loop-Ansatz im Rahmen von datengestützten Vorausschauprozessen zur strategischen Entscheidungsfindung vor. Dabei wird beschrieben, wie neben wissenschaftlicher Expertise zur Validierung und Qualitätssicherung auch Rezipienten zur Kontextualisierung und Sicherung der Praxisrelevanz im Prozess miteingebunden werden. Hierfür wird ein Ansatz für datengestützte Vorausschau im Bereich Quantencomputing vorgestellt. Entlang des generischen mehrstufigen Vorgehens für Horizon Scanning-Prozesse (Scoping, Scanning, Trenderkennung, Wirkungsanalyse und Strategieentwicklung) wird der Mensch-KI-Kollaborationsprozess anhand eines Fallbeispiels konkretisiert und analysiert. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die wirkungsvolle Interaktion der Menschen mit dem KI-System in den einzelnen Schritten gelegt, um eine Datenbasis aufzubauen, diese iterativ zu validieren und zu bewerten sowie anschließend in einem Dashboard zu visualisieren. Damit wird die interaktive Auseinandersetzung für die Zielgruppe ermöglicht, Zusammenhänge zwischen den zugrunde liegenden Konzepten im Untersuchungsfeld veranschaulicht und deren dynamische Veränderung über die Zeit beobachtbar gemacht. Die Ergebnisse adressieren die Frage, ob und wie die kontinuierliche Verzahnung von Expert*innenwissen mit KI-generierten Analysen dabei unterstützen kann, methodische Biases durch eine quantitative und qualitative Bewertung zu reduzieren und die Aktualität des Vorausschau-Prozesses durch eine iterative Erhebung zu erhöhen.

Schlüsselworte

Strategische Vorausschau, Trendmonitoring, Mensch-KI-Interaktion, Human-in-the-Loop-Ansatz, Horizon Scanning

Collaborative human-AI interaction for data-driven foresight: A human-in-the-loop approach to trend monitoring in quantum computing

Abstract

Given the growing volumes of data and the dynamics and complexity of deep tech, previous approaches to trend analysis quickly reach their limits as soon as a high proportion of manual data exploration and pattern recognition is required [Cuh20]. Collaborative human-AI interaction represents an opportunity to combine qualitative trend expertise with quantitative data mining methods and thus identify weak signals and emergent trends systematically and time-efficiently at an early stage [KKD23]. This article examines how the transformative potential of artificial intelligence (AI) can be used for foresight methods and presents a practice-oriented, collaborative human-in-the-loop approach in the context of data-supported foresight processes for strategic decision-making [BHB+25, GW22]. It describes how, in addition to scientific expertise for validation and quality assurance, the recipients are involved in the process for contextualization and for ensuring practical relevance.

For this purpose, a procedure scheme for data-supported foresight in the field of quantum computing is presented. Alongside the generic multi-step procedure for horizon scanning processes (scoping, scanning, trend detection, impact analysis and strategy development), the human-AI collaboration process is concretized and analyzed along the case study [GGW+22]. Particular attention is paid to the effective interaction of people with the AI system in the individual steps to build up a database, validate and evaluate it iteratively and then visualize it in a dashboard. This will enable interactive engagement for the target group, illustrate connections between the underlying concepts in the field of investigation and make their dynamic change observable over time.

The results address the question of whether and how the continuous integration of expert knowledge with AI-generated analyses can help to reduce methodological biases through quantitative and qualitative evaluation and increase the timeliness of the foresight process through an iterative survey.

Keywords

Strategic foresight, trend monitoring, human-AI interaction, human-in-the-loop approach, horizon scanning

1 Bedarf an einer interaktiven Mensch-KI-Kollaboration für datengestützte Vorausschau

In einem zunehmend dynamischen und datenintensiven Umfeld gewinnt die strategische Vorausschau als Instrument zur frühzeitigen Identifikation von relevanten Entwicklungen zunehmend an Bedeutung [Ves25]. Dies gilt besonders im Kontext emergenter Technologien und sogenannter „Deep Tech“-Domänen wie beispielsweise Quantencomputing, Materialherstellung oder Biotechnologie. Darin stehen Organisationen vor der Herausforderung, relevante Signale mit einer hohen Aussagekraft aus einem unübersichtlichen Korpus wissenschaftlicher Literatur, Vorab-Publikationen, journalistischer und weiterer Wissensquellen schnell und kontinuierlich zu extrahieren und in fundierte Entscheidungsgrundlagen zu überführen [BPT+20]. Klassische Methoden der strategischen Vorausschau stoßen hierbei zunehmend an methodische und kapazitäre Grenzen, insbesondere wenn es um die manuelle Analyse großer, heterogener Datenbestände und die Identifikation emergenter Trends geht [Cuh20]. Horizon Scanning gilt dabei als wichtige Methode, um unbekannte Entwicklungen zu entdecken und systematisch Erkenntnisse zu gewinnen, die die strategische Entscheidungsfindung unterstützen [PBB+12]. Diese spezifische Methode ermöglicht die frühzeitige, iterative Betrachtung und Analyse eines breiten Spektrums neuer Informationen, sodass etwaige Herausforderungen, Probleme, Risiken und Chancen für die Zukunft rechtzeitig erkannt werden können.

In diesem Spannungsfeld rücken Ansätze in den Fokus, die auf eine systematische Verknüpfung von Künstlicher Intelligenz (KI) und menschlicher Expertise setzen. Gerade seit der breiten Verfügbarkeit und dem Hype um KI-Chatbots wird die Frage, wie ein einordnender Blick auf Aussagen von KI-Systemen erfolgen kann, umso dringlicher. Das Ziel ist es, die jeweiligen Stärken – also die datenverarbeitende Leistungsfähigkeit algorithmischer Systeme einerseits und die kontextabhängige Deutungsfähigkeit menschlicher Akteur*innen andererseits – in einer kollaborativen Interaktion nutzbar zu machen. Solche Human-in-the-Loop-Ansätze versprechen nicht nur eine höhere Ergebnisqualität durch Filterung und interdisziplinäre Validierung der betrachteten Informationen, sondern auch eine transparente und nachvollziehbare Ableitung von Handlungsoptionen.

Der vorliegende Beitrag geht der Frage nach, wie datengestützte Vorausschauverfahren durch eine gezielte Mensch-KI-Interaktion methodisch und praktisch ausgestaltet werden können, um die strategische Handlungsfähigkeit von Organisationen in dynamischen und emergenten Innovationsfeldern zu stärken. Anhand eines Fallbeispiels im Bereich Quantencomputing wird ein konkretes Vorgehensschema skizziert, das die verschiedenen Phasen eines Horizon-Scanning-Prozesses mit Elementen der Mensch-KI-Interaktion verknüpft. Im Zentrum steht dabei nicht nur die Nutzung der Leistungsfähigkeit von KI-Modellen, um Daten zu sammeln, Suchbegriffe zu erweitern oder Trendbeschreibungen zu generieren, sondern vor allem deren Integration in die partizipative Deutung der identifizierten Trends. Dabei wird auf erste Erfahrungen und Zwischenstände aus dem Fraunhofer HNFIZ Anwendungsorientierte Quanten-KI zurückgegriffen, das u. a. zum Ziel hat, das Potenzial und die Entwicklungsrichtungen von Quantencomputing und KI in einem praxisorientierten Dashboard für die Industrie systematisch aufzubereiten.

Die initiale Analyse des marktverfüglichen Angebots von Horizon Scanning-Softwares für dieses Vorhaben zeigt ein breites Spektrum an funktionalen Ausrichtungen und methodischen Ansätzen. Besonders wertvoll erscheinen spezialisierte Systeme wie Trendradare, die eine breite Datensammlung mit einem starken Fokus auf Zeitreihenanalysen kombinieren und durch Visualisierungen eine nutzerfreundliche Darstellung komplexer Zusammenhänge ermöglichen. Dabei sind insbesondere Systeme hervorzuheben, die eine Kombination qualitativer (z. B. gesellschaftliches Sentiment gegenüber emergenten Technologien) und quantitativer Indikatoren (z. B. Wachstumsrate wissenschaftlicher Veröffentlichungen zu bestimmten Forschungsbereichen von emergenten Technologien) verwenden. Ebenfalls ist die Integration von manuell erstellten Wissensgraphen verknüpft mit einem selbstlernenden Klassifikationsalgorithmus von Vorteil. So können einzelne Trendkandidaten auf ihre Relevanz überprüft und im Wissensgraphen verortet werden.

Im direkten Vergleich der Anbieter zeigen sich jedoch auch einige Nachteile bei den verwendeten Methoden der Software-Tools. So fehlte bei mehreren Anbietern Transparenz hinsichtlich Funktionsumfang, Datenquellen und Analyseverfahren, was die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse stark reduzierte und für die geplante Anwendung im Kontext Forschung und Technologieentwicklung einen Nachteil darstellt. Bei sehr komplexen Tools bestand zudem ein hoher Einarbeitungsaufwand, der den niedrigschwälligen Zugang für breite Nutzer*innengruppen erschwerte. Andere Tools wiederum ermöglichen lediglich eine manuelle Literaturrecherche ohne automatisierte Analysen, was ihre Nützlichkeit für dynamische Vorausschauprozesse begrenzt. Ein weiteres zentrales Problem betrifft die Qualität der verwendeten Daten. Es bleibt bei einigen Anbietern unklar, welche Quellen konkret ausgewertet werden. Promptbasierte Chatbots, etwa auf Basis von Large Language Models, liefern teilweise präzise Ergebnisse, scheiden jedoch wegen unzureichender Quellentransparenz und Halluzinationen aus. Schließlich sind auch thematische Begrenzungen zu beachten: Manche Softwareangebote mit einem starken Fokus auf einzelne Datenquellen (z. B. Patentdatenbanken) oder spezifische technologische Domänen (z. B. Künstliche Intelligenz) eigneten sich in unseren Tests nicht für die beabsichtigte Fragestellung.

Die folgende Forschungsfrage steht deshalb im Mittelpunkt des Beitrags: Wie kann durch die gezielte Gestaltung kollaborativer Mensch-KI-Interaktionen in datengestützten Vorausschauprozessen eine höhere Relevanz, Validität und Effizienz bei der Identifikation und Bewertung von Trends im Bereich emergenter Technologien erzielt werden?

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden ein empirisch informierter Erfahrungsbericht zur Weiterentwicklung von Methoden der strategischen Vorausschau in Kombination mit intelligenten Assistenzsystemen formuliert. Dieser ist in Zusammenarbeit zwischen zwei Teams mit unterschiedlichen Perspektiven am Fraunhofer IAO entstanden: Das Center for Responsible Research and Innovation brachte seine Expertise aus der Zukunftsforschung ein und das Team Quantencomputing brachte seine technologische Expertise ein. Damit soll auch ein Beitrag geleistet werden um ein Vorgehensschema bei praxisorientierten Herausforderungen wie der Auswahl von Horizon Scanning Software, der transparenten Ergebnisvalidierung und Sicherung der Praxisrelevanz der Ergebnisse zu liefern. So werden Impulse für den zukünftigen Einsatz hybrider Mensch-KI-Ansätze für die strategische Vorausschau im Rahmen eines Horizon Scanning für Forschung, Politik und Unternehmenspraxis bereitgestellt.

Der folgende Abschnitt 2 beschreibt dafür den theoretischen Rahmen, in dem KI-Anwendungen in der datengestützten Vorausschau eingesetzt werden können. Danach wird in Abschnitt 3 das methodische Vorgehen beschrieben, welches dem Horizon Scanning zugrunde liegt. Dabei wird das etablierte Vorgehen aus den einzelnen Prozessphasen und die Einbindung des hybriden Mensch-KI-Einsatzes erläutert. Im vierten Abschnitt werden die Erfahrungen aus der Erprobung des Ansatzes dargestellt und Herausforderungen und Lerneffekte zusammengefasst. Zum Schluss werden noch die zentralen Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt systematisch dargestellt und ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben.

2 Theoretischer Rahmen: KI-Anwendungen in der datengestützten Vorausschau

KI-Anwendungen können in Prozessen der datengestützten Vorausschau in mehreren Phasen unterstützend wirken. Die Form der Implementierung von Vorausschau-Prozessen variiert jedoch signifikant zwischen verschiedenen Organisationen. Diese Studie bezieht sich auf den theoretischen Rahmen, der vier voneinander abgrenzbare Aktivitäten im Vorausschau-Prozess verortet [KAH15, VRW+22]: 1) Schwache Signale für Veränderungen identifizieren, 2) Trendanalysen und Mustererkennung um Wechselwirkungen zwischen Trends und Treibern zu analysieren, 3) Strategieentwicklung und Entscheidungsfindung durch Szenarioanalysen bzw. Bestimmung von Stärken, Schwächen oder Lücken in aktuellen Strategien und zuletzt 4) die Implementierung durch einen Maßnahmenplan oder eine Roadmap. In diesem Beitrag soll eine praxisorientierte Fallstudie zu den ersten drei Schritten dargelegt werden. Es ist jedoch wichtig zu erwähnen, dass die Schritte nicht klar voneinander abgegrenzt werden können und in der Horizon Scanning Methode auch teilweise überlappend Anwendung finden können. Die Beschreibung des Roadmapping-Prozesses wird durch weitere Aktivitäten im Rahmen des Forschungsprojekts verfolgt und ist nicht Teil dieses Beitrags [siehe LBD+24].

Identifikation von schwachen Signalen: Das Vorgehen des computerbasierten Textminings zum Zweck der Identifikation von schwachen Signalen ist seit über 50 Jahren in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben [vgl. Ans75]. Die größten Hürden in der Anwendung stellten jedoch bislang ineffiziente Suchstrategien, mangelnde Automatisierung und ein Bedarf an Machine Learning Methoden zum Scanning und Harmonisieren der Quellen dar [MG18]. Moderne Methoden des Natural Language Processing sind mittlerweile ein vielversprechender Ansatz, um diese Hürden zu überwinden, um in kürzester Zeit eine große Anzahl Dokumente zu durchsuchen (z. B. wissenschaftliche Publikationen, Patente, Newsfeeds, Social-Media-Beiträge) [VRW+22]. Insbesondere das automatische, iterative Scraping von Texten, das Ranking der Relevanz von frühen, noch schwachen Veränderungsmustern potenziell bedeutender Veränderungen und das Erstellen von harmonisierten Beschreibungen für den Daten-Export gehört zu den Stärken von KI-Anwendungen [SSM+25].

Trendanalyse und Mustererkennung: Während es ein hohes Potenzial im Bereich KI-gestützter Datensammlung gibt, lassen sich bei der Trendanalyse und Mustererkennung mehrere Herausforderungen identifizieren, die sich oft auf die Validität und Relevanz der Ergebnisse auswirken [GGW+22]. Da die interpretative Validität von KI-generierten Ergebnissen begrenzt ist, können kontextbezogene Äußerungen leicht verzerrt oder falsch interpretiert werden (vgl.

[TT10]). Menschliche Expertise bleibt deshalb oft unverzichtbar, bringt jedoch selbst potenzielle kognitive Biases mit sich [SGW20]. Die Kombination beider Perspektiven im Rahmen von Human-in-the-Loop-Ansätzen kann helfen, solche Biases zu kompensieren [HGF+19]. Das setzt jedoch eine bewusste Gestaltung der Mensch-KI-Interaktion voraus. Zudem ist die Relevanz der Analyseergebnisse nicht universell: Unterschiedliche Akteure (z. B. Wirtschaft oder Forschung) bewerten Informationsbedarfe verschieden. Um Akzeptanz zu schaffen, müssen die eingesetzten Datenquellen und Analyseansätze systematisch hinsichtlich ihrer Eignung für verschiedene Fragestellungen untersucht und aufeinander abgestimmt werden.

Strategieentwicklung und Entscheidungsfindung: Bei der Ableitung von Strategien aus den Vorausschau-Ergebnissen können KI-Anwendungen hilfreiche Impulse liefern, um langfristige Überlegungen in die Entscheidungsfindung einfließen zu lassen [GGW+22]. Eine kollaborative Verzahnung mit menschlicher Expertise ist hier jedoch essenziell, um geeignete Maßnahmen zu identifizieren (z. B. für politische Entscheidungsträger*innen) und Herausforderungen in der praktischen Anwendung zu minimieren [SAA+12]. So gibt es mehrere Risiken, die zu beachten sind [JFJ+23]: Bequemlichkeit oder Ermüdung im Projektteam kann dazu führen, dass KI-Ergebnisse unreflektiert übernommen oder fehlinterpretiert werden, wenn ein Verständnis für die Funktionsweise des Systems fehlt. Außerdem sind KI-Anwendungen nicht in der Lage implizite Werte, kulturelle Unterschiede oder politische Interessenlagen abzuwägen. Da Strategieentwicklung und Entscheidungsfindung ein hohes Maß an Empathie erfordert, um Spannungsfelder zu moderieren, können in späteren Phasen Vorbehalte gegenüber KI-generierten Handlungsempfehlungen zu mangelnder Akzeptanz bei Entscheidungsträgern und Umsetzenden führen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass KI-Anwendungen heute vor allem dort eingebunden werden, wo große Datenmengen bewältigt oder Trends analysiert werden sollen. Die Anwendungen automatisieren zum einen die Datensammlung und sind zeiteffiziente Lösungen für eine höhere Abdeckung des Suchfelds. Zum anderen können sie eine vorläufige Analyse durch die visuelle Aufbereitung und Mustererkennung liefern. Allerdings ist eine differenzierte Betrachtung der Schnittstellen zur menschlichen Expertise entscheidend: KI liefert im datengestützten Vorausschauprozessen das *Was* (z. B. Daten) und das *Wann* (z. B. Muster, Zeitreihenanalysen), während Menschen das *Warum* und *Wie* kollaborativ beitragen (z. B. Kontext, Bedeutung, strategische Implikationen). Diese Aufteilung bildet die Grundlage einer kollaborativen Mensch-KI-Interaktion.

3 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen des vorliegenden Beitrags orientiert sich an den fünf generischen Phasen des Horizon Scanning als einer Methode der datengestützten Vorausschau [GGW+22]: Scoping, Scanning, Trenderkennung, Wirkungsanalyse und Strategieentwicklung. Das vorrangige Erkenntnisinteresse liegt dabei auf der Gestaltung und Bewertung der Mensch-KI-Interaktion im Rahmen der Fallstudie im Bereich Quantencomputing. Ziel ist es, zu untersuchen, wie algorithmische Systeme und menschliche Expertise kollaborativ verbunden werden können, um Trends im Bereich emergenter Technologien frühzeitig zu identifizieren, zu validieren und strategisch einzuordnen.

3.1 Mensch-KI-Interaktion im Fokus

Bild 1 zeigt die Struktur des kollaborativen Analyseprozesses. In einem dreistufigen Verfahren identifiziert zunächst eine algorithmische Suche potenzielle Trends aus den hinterlegten Quellen. Diese Trendkandidaten werden im Anschluss durch Fach- sowie Foresight-Expert*innen des Fraunhofer IAO bezüglich ihrer Relevanz validiert und gefiltert. Der Mehrwert der KI liegt insbesondere in der effizienten Vorauswahl der Dokumente, wohingegen die menschlichen Akteur*innen für die kontextuelle Einordnung und Bewertung zuständig bleiben.

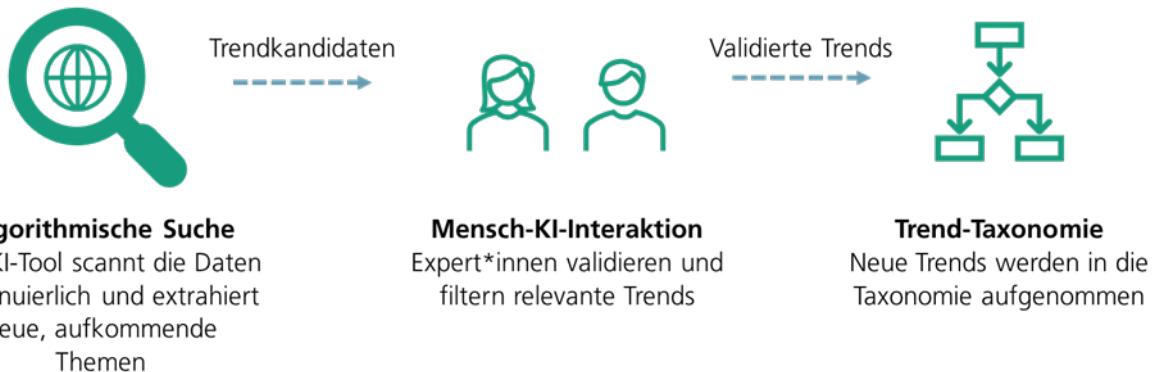


Bild 1: Schematische Darstellung der Mensch-KI-Interaktion

3.2 Phasen des Horizon Scanning

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde ein methodisches Vorgehen durchlaufen, das sich an die generischen Phasen eines Horizon-Scanning-Prozesses orientiert. Das Vorgehen wird in Bild 2 dargestellt und nachfolgend beschrieben.

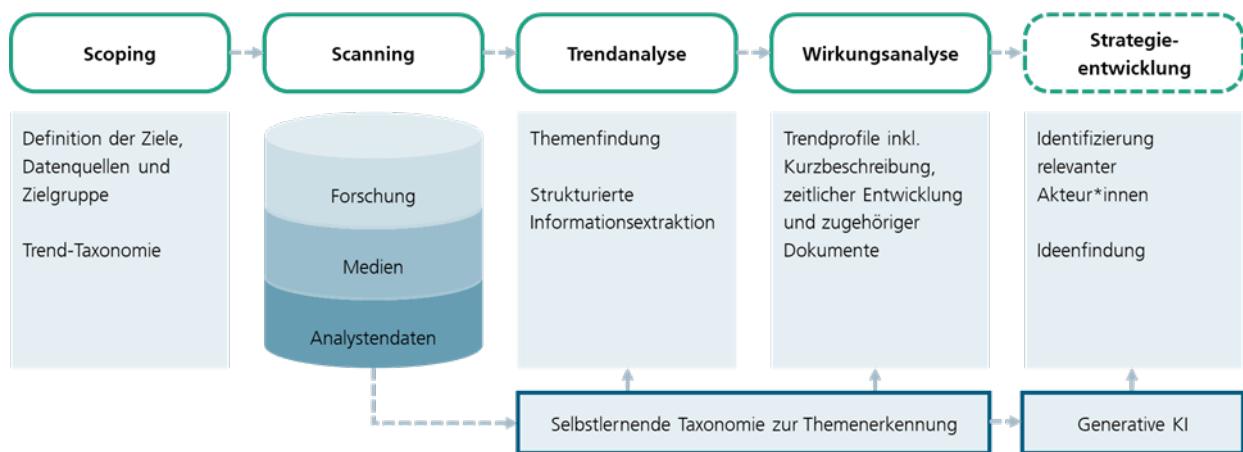


Bild 2: Phasen des Horizon Scanning (basierend auf [GGW+22])

Zu Beginn (Scoping-Phase) erfolgt die Definition der Untersuchungsziele, relevanter Datenquellen sowie der Zielgruppe. Gleichzeitig wird eine vorläufige Trend-Taxonomie etabliert, die als Referenzrahmen für die spätere Analyse dient. In der nachfolgenden Scanning-Phase werden große Datenmengen aus wissenschaftlichen Publikationen, Nachrichtenquellen und Analysteninformationen mithilfe von KI-gestützten Verfahren systematisch durchsucht. Hierbei

kommen selbstlernende Algorithmen zur Anwendung, die eine automatisierte Themenerkennung ermöglichen und Trendkandidaten zur Anpassung der initialen Trendtaxonomie vorschlagen können. In der Phase der Trendanalyse werden strukturierte Informationen aus den Daten extrahiert (z. B. Share-of-Voice), geclustert und in einheitlich formatierte Trendprofile überführt. Diese beinhalten Kurzbeschreibungen, zeitliche Entwicklungsverläufe sowie eine Darstellung der eingeflossenen Dokumente. Generative KI-Modelle unterstützen in dieser Phase die textuelle Beschreibung der Themen, etwa durch das Erstellen von Trendnarrativen oder Schlagwortzusammenfassungen. Die anschließende Bewertung relevanter Akteur*innen erfolgt ebenfalls KI-unterstützt, wobei Organisationen vorgeschlagen werden, die besonders aktiv in das Trendgeschehen eingreifen.

3.3 Datenbasis und Quellenstrategie

Die zugrundeliegende Datenbasis des Scanning-Prozesses ist in Bild 3 zusammengefasst. Sie setzt sich aus drei Hauptkategorien zusammen: Forschungsliteratur (insbesondere das für den Fachbereich wichtige Open-Access-Repository arXiv), Medienquellen (insbesondere branchenspezifische Newsfeeds wie quantumzeitgeist.com) und Analystendaten (insbesondere Marktanalysen wie beispielsweise der jährlich erscheinende Quantum Technology Monitor von McKinsey & Company). Diese Quellen werden auf die vordefinierten Schlagworte gescannt und der Einsatz KI-gestützter Filter- und Klassifikationssysteme trägt dazu bei, inhaltlich relevante Trends zu identifizieren und redundante Informationen zu eliminieren.

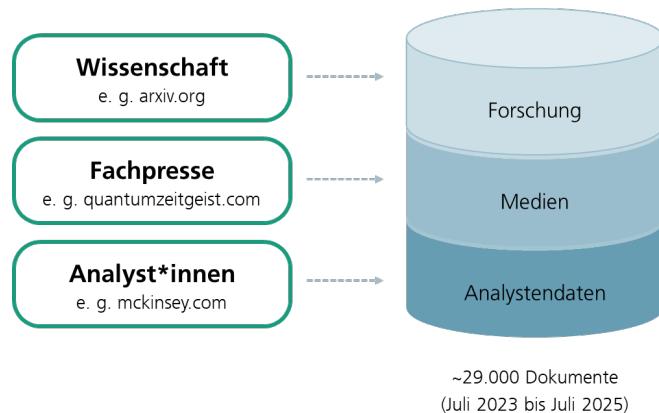


Bild 3: Datenquellen für das Horizon Scanning

Die Integration dieser Datenquellen in den iterativen Horizon Scanning Prozess erlaubt es, eine dynamisch aktualisierbare Wissensbasis zu bilden. Dabei zeigt sich, dass der Mehrwert der KI-Anwendung in diesem Schritt weniger in der finalen Bewertung liegt, sondern vielmehr in der Vorstrukturierung und Durchführung repetitiver Datensammlungen.

4 Ergebnisse und Erfahrungen aus der Fallstudie im Bereich Quantencomputing

Die unten aufgeführten Ergebnisse sind als erster Erfahrungsbericht zu verstehen, die von weiterer Forschung und Diskussion profitieren würden. Darin wird zuerst auf die Auswahlkriterien für die angewandte KI-gestützte Horizon Scanning-Software eingegangen, im Anschluss auf das Vorgehensschema und zuletzt auf die Herausforderungen und mögliche Lösungsansätze für die Interaktion der menschlichen Expert*innen mit den Ergebnissen der KI-gestützten Horizon Scanning-Software.

4.1 Auswahlkriterien für KI-gestützte Horizon Scanning-Software

Aus der praktischen Anwendung in der vorliegenden Fallstudie lassen sich fünf zentrale Erkenntnisse ableiten, die richtungsweisend für die Auswahl des verwendeten Systems waren:

Zugang zu qualitätsgesicherten Wissensquellen

Ein wiederkehrendes Hindernis in der praktischen Anwendung zeigt sich in der eingeschränkten Verfügbarkeit wissenschaftlicher und journalistischer Publikationen. Obwohl KI-Systeme große Mengen frei zugänglicher Informationen verarbeiten können, endet die Recherche häufig an Bezahlschranken (sog. Paywalls), insbesondere bei Fachzeitschriften und etablierten Medienhäusern. Dies limitiert die Breite und Tiefe der Wissensquellen, auf die datenbasierte Vorausschau zurückgreifen kann. Insbesondere für Organisationen ohne institutionellen Zugang zu Bibliotheken oder Lizenzen stellt dies ein erhebliches strukturelles Defizit dar. Strategien zum offenen Zugang („Open Access“) sowie die Integration lizenziert Datenbanken schaffen mittelfristig Abhilfe (z. B. arXiv).

Automatisiertes Scanning

Ein zentraler Mehrwert ergibt sich aus der automatisierten Erhebung und Verarbeitung großer Datenmengen. Anstelle zeitintensiver manueller Rechercheprozesse, die typischerweise mehrere Wochen in Anspruch nehmen können, sollte das ausgewählte KI-gestützte Tool eine kontinuierliche und nahezu verzögerungsfreie Datenerfassung ermöglichen. Dadurch entsteht eine höhere Aktualität und Reaktionsfähigkeit im strategischen Entscheidungsprozess.

Multilinguale und branchenübergreifende Datenerfassung

Ein wesentliches Potenzial zeigt sich in der Fähigkeit KI-gestützter Systeme, Signale aus unterschiedlichen Märkten, Sprachen und kulturellen Kontexten systematisch zu erfassen und zu verarbeiten. Während klassische Softwaretools häufig auf nationale oder sektorale Informationsquellen beschränkt bleiben, ermöglichen moderne KI-Tools den Zugang zu global verstreuten Datenquellen in nahezu Echtzeit. Dies erhöht nicht nur die Informationsbreite, sondern verbessert auch die kulturelle und geopolitische Kontextualisierung strategisch relevanter Entwicklungen.

Transparente Operationalisierung in mehreren Schritten

Ein weiteres wichtiges Auswahlkriterium für die Fallstudie betrifft die Art und Weise der Operationalisierung. Der Ansatz, mit einem klar umrissenen, ressourcenschonenden Pilotprojekt zu beginnen und die Anwendung iterativ sowie skalierbar auszuweiten, hat sich als besonders wirksam erwiesen. Diese Vorgehensweise reduziert Einstiegshürden, fördert organisationsinternes Lernen und erlaubt eine gezielte Anpassung der Systeme an die spezifischen Bedarfe der Organisation. Gleichzeitig werden technologische und organisationskulturelle Reibungsverluste minimiert, was die langfristige Akzeptanz und Wirkung des Horizon Scanning erhöht.

Mustererkennung und Visualisierungen

Die Fähigkeit, verborgene Muster in heterogenen, teilweise unstrukturierten Datenbeständen zu erkennen, stellt einen weiteren Kernvorteil der KI-basierten Vorausschau dar. Durch Verfahren des maschinellen Lernens können auch schwache Signale und diskontinuierliche Entwicklungen frühzeitig identifiziert werden, die in klassischen, hypothesengesteuerten Analysen oftmals unentdeckt bleiben. Dies unterstützt frühzeitige Identifikation und Visualisierung potenzieller Disruptionen und es lassen sich robustere Zukunftsprojektionen und Transformationspfade entwickeln.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass adaptiv gestaltbare Foresight-Tools mit klarer strategischer Ausrichtung, einem hohen Maß an Datenintegration und transparenter Methodik derzeit das größte Potenzial für die praktische Anwendung im Bereich der datengestützten Vorausschau bieten. Die Auswahl eines geeigneten Tools sollte jedoch stets fallabhängig erfolgen und sowohl methodische Anforderungen als auch organisatorische Ressourcen berücksichtigen.

4.2 Vorgehensschema

Nach der Auswahl der entsprechenden Software wurde in der Fallstudie das Vorgehensschema agil in vier Entwicklungsschritten, sogenannten Sprints, als Zusammenarbeit zwischen einem Team mit Foresight-Expertise, einem Team mit technischer Expertise in Quantencomputing und einem Dienstleister für Horizon Scanning-Software umgesetzt¹. Das Ziel war es, das Potenzial und die Entwicklungsrichtungen von Quantencomputing und KI in einem praxisorientierten Dashboard für die Industrie systematisch aufzubereiten. Bild 4 zeigt schematisch den Ablauf in den einzelnen Phasen. Im Folgenden wird das Vorgehen kurz erläutert:

¹ Beteiligt waren das Center for Responsible Research and Innovation und das Team Quantencomputing des Fraunhofer IAO sowie die Anacode GmbH

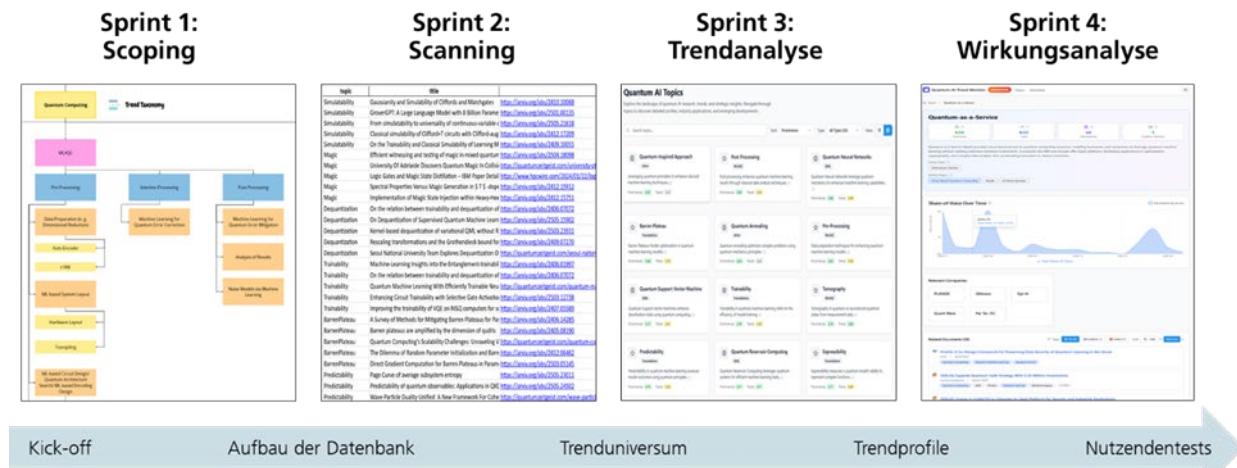


Bild 4: Vorgehensschema im Forschungsprojekt

Sprint 1 – Scoping

Zu Beginn wurden gemeinsam mit Domänenexperten die Zielsetzung und der thematische Fokus in einer Trendtaxonomie definiert. Auf Basis von zwei Workshops wurde festgelegt, welche Unterthemen des Quantencomputing (z. B. Hardware, Software/ Algorithmen, Anwendungen in Industrie, Markt- und Förderlandschaft) besonders betrachtet werden sollen. Daraus wurde ein Suchraster abgeleitet: relevante Schlagworte wurden bestimmt und durch eine algorithmische Suchwort-Ergänzung mit Synonymen ergänzt, um möglichst alle verwandten Phänomene zu erfassen. Diese erste Trendtaxonomie stellt Kategorien dar, unter denen zugehörige Dokumente als Signale eingeordnet werden können. Diese Vorarbeiten erfolgten im ersten Schritt rein manuell durch Expert*innen und wurden im Anschluss durch das Software-Programm datengetrieben erweitert. Anschließend wurden geeignete Datenquellen bestimmt und für das Software-Tool angebunden. Hier wurde insbesondere auf offene wissenschaftliche Repositorien wie arXiv zurückgegriffen, sowie auf kommerzielle Tech-News-Aggregatoren und Daten von Marktanalysten. Am Ende von Sprint 1 lagen ein initialer Pool an relevanten Datenquellen sowie ein klar abgesteckter thematischer Rahmen vor.

Sprint 2 – Scanning

In dieser Phase wurde ein Webcrawler konfiguriert, um Publikationen und Artikel zu den Suchbegriffen aus den letzten 24 Monaten zu sammeln. Die KI-Komponenten in diesem Schritt bestanden u. a. aus einer Schlagwort-Extrahierung und einem Filter, um Dokumente mit niedriger Relevanz auszuschließen (z. B. Dubletten oder rein populärwissenschaftliche Kurzmeldungen). Es erfolgte ebenfalls eine tiefergehende Betrachtung der gesammelten Informationen. Ein auf die Domäne trainierter Topic-Modeling-Algorithmus analysierte die Dokumente auf häufige Themen und Begriffsmuster. Dadurch wurden erste Clustervorschläge erarbeitet, um ein Trenduniversum aus den Daten aufzuspannen. Die Stärken des KI-Einsatzes zeigten sich hier deutlich: Die KI erweiterte eigenständig die Suchbegriffe um verwandte Konzepte und schloss damit zusätzliche relevante Publikationen im Scanning ein. Allerdings traten auch erste Herausforderungen zutage. Insbesondere musste darauf geachtet werden, hochwertige von weniger

verlässlichen Informationen zu trennen. Die KI neigte dazu, Marketing-Claims und unbestätigte Ankündigungen (z. B. aus Pressemitteilungen) genauso aufzunehmen wie begutachtete Forschungsarbeiten. Hier war manuelle Filterung notwendig: Das Team sichtete die vorgeschlagenen Trends und eliminierte irrelevante Inhalte oder solche, die sich nicht wissenschaftlich belegen ließen. So wurde sichergestellt, dass die Trendprofile auf validen Quellen basierten. Dieser Schritt offenbarte die Notwendigkeit, trotz Automatisierung weiterhin den Expert*innenblick einzusetzen, um Qualität vor Quantität zu stellen.

Sprint 3 – Trendanalyse

In Sprint 3 kam ein generatives Sprachmodell zum Einsatz, um aus den gesammelten Dokumenten Kurz-Zusammenfassungen zu extrahieren. So wurde für jedes identifizierte mögliche Trendthema eine automatische Trendbeschreibung generiert, die die Kernaussagen der zugrundeliegenden Quellen zusammenfasste. Dies resultierte in rund 60 vorläufigen Trends. Die Beschreibungstexte wurden mit Fachexpert*innen diskutiert und hinsichtlich ihrer Validität bewertet und gefiltert. In diesem Rahmen wurden die zusätzlich identifizierten Trends in die zuvor definierte Taxonomie eingeordnet bzw. die Taxonomie verfeinert. So wurden beispielsweise einzelne Trendthemen zusammengeführt oder feiner aufgeteilt und die Taxonomie kontinuierlich weiterentwickelt. Die KI-gestützten Trendbeschreibungen dienten als Ausgangsbasis und wurden nun iterativ überarbeitet: Fehlende Aspekte wurden ergänzt und überbetonte Aspekte abgeschwächt. Das betraf beispielsweise Trendbeschreibungen, die aus einem einzigen prominenten Dokument weitreichende Schlüsse zogen. So entstanden durch die Mensch-KI-Interaktion ca. 30 Trends mit einem fundierten Trendprofil, das Relevanz-Metriken, eine skizzenhafte Trendbeschreibung, Einordnung in die Kategorien der Taxonomie, eine Visualisierung der Share-of-Voice über einen Zeitverlauf und die zugehörigen Dokumente beinhaltete.

Sprint 4 – Wirkungsanalyse

Im abschließenden Sprint wurden die Ergebnisse konsolidiert und in eine zugängliche Form für potenzielle Nutzende gebracht. Es wurde eine grafische Darstellung als Raster erstellt, um einen schnellen Überblick für die validierten Trends zu ermöglichen. Schließlich werden in einem letzten Schritt User Tests durchgeführt. Perspektivisch sollen im weiteren Verlauf des Projekts noch strategische Implikationen in die Trendprofile einfließen. So sollen beispielsweise die organisationalen Verbindungen für die relevanten Dokumente extrahiert werden. Darauf aufbauend können Handlungsoptionen dargestellt werden (z. B. Potenzial für Forschungskooperationen). Der KI-Einsatz, um aus den erkannten Signalen konkrete Schlussfolgerungen für die Organisation abzuleiten, ist in diesem letzten Schritt jedoch gering, lediglich unterstützend. Abschließend wurde die Bedienung des Tools dokumentiert.

Zusammengefasst spiegelt der vierstufige Projektablauf die Annahme, dass KI den Prozess der Datensammlung und Trendanalyse erheblich beschleunigen und erweitern kann, in den darauf folgenden Schritten aber nur geringeres Potenzial für Effizienzsteigerungen zeigt. Gleichzeitig ist die Einbindung menschlicher Expertise in jedem Sprint notwendig, um die Qualität der Ergebnisse sicherzustellen und die Praxisrelevanz der Informationen strategisch einzuordnen. Der

gewählte agile Ansatz hat sich bewährt, um schrittweise Vertrauen in die gesammelten Daten aufzubauen und den Prozess adaptiv zu verfeinern.

4.3 Herausforderungen und Lösungsansätze für eine kollaborative Mensch-KI-Interaktion

Die Erfahrungen aus der Fallstudie verdeutlichen, dass der effektive Einsatz von KI in datengestützten Vorausschauprozessen untrennbar mit einem strukturierten, kollaborativen Vorgehen und tiefem Domänenwissen von menschlichen Expert*innen verknüpft ist. Im Folgenden wird beschrieben, wie zentrale Herausforderungen im Umgang mit KI-generierten Daten gezielt durch unterschiedliche Rollen und Eingriffe von Expert*innen entlang eines Human-in-the-Loop-Ansatzes adressiert werden können. Dieser Ansatz trägt entscheidend zur Sicherstellung von Ergebnisqualität, Relevanz und strategischer Anschlussfähigkeit bei. Vier zentrale Herausforderungen wurden im Projektverlauf identifiziert (siehe Bild 5):

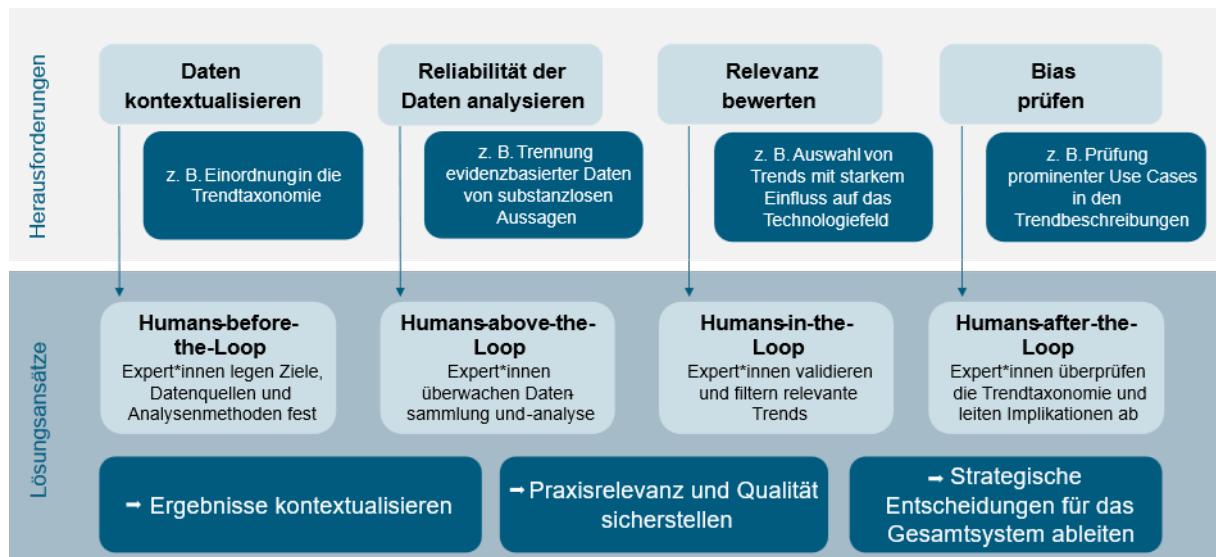


Bild 5: Herausforderungen und Lösungsansätze für eine kollaborative Mensch-KI-Interaktion

Daten kontextualisieren

KI-Systeme liefern große Mengen potenziell relevanter Informationen, doch die Bedeutung erschließt sich erst durch eine gezielte Einordnung in etablierte wissenschaftliche Kategorien. In der Praxis bedeutete dies, dass die identifizierten Informationen in eine vorab definierte Trendtaxonomie überführt werden mussten, um die thematische Passfähigkeit zu erkennen und falsche Treffer zu vermeiden. Diese Kontextualisierung erfolgte als „Human-before-the-Loop“: Die beteiligten Expert*innen legten die Ziele, Datenquellen und Analyseparameter des KI-gestützten Systems fest und schafften so die Grundlage für eine zielgerichtete Datenexploration.

Reliabilität der Daten analysieren

Ein wesentlicher Nachteil vieler KI-Anwendungen liegt in der gleichberechtigten Sammlung von Quellen unterschiedlicher Qualität. Die Trennung zwischen evidenzbasierten, spekulativen oder rein werblichen Inhalten kann mit einem KI-System nur begrenzt automatisiert werden.

Im vorliegenden Projekt übernahmen dies die Expert*innen im Modus des „Human-above-the-Loop“, indem sie die automatisiert gesammelten Daten auf inhaltliche Validität prüften und filterten. So wurden beispielsweise Pressemitteilungen oder rein werbliche Texte als weniger belastbare Information gekennzeichnet und nur bedingt in die Auswertung aufgenommen. Auf diese Weise konnte die Praxisrelevanz und wissenschaftliche Qualität der identifizierten Inhalte gewährleistet werden.

Relevanz bewerten

Die bloße Erkennung eines Musters oder einer Thementendenz durch KI bedeutet nicht zwangsläufig, dass es sich um einen strategisch relevanten Trend handelt. Daher war es erforderlich, eine Priorisierung der Ergebnisse vorzunehmen, die nicht nur auf Häufigkeit oder Wachstum basierte, sondern deren potenziellen Einfluss auf das betrachtete Technologiefeld. Diese Aufgabe wurde im Modus „Human-in-the-Loop“ ausgeübt: Expert*innen validierten, filterten und priorisierten relevante Trends unter Berücksichtigung ihrer Erfahrung, Branchenkenntnis und strategischer Einschätzung.

Bias prüfen

KI-gestützte Trendanalysen laufen Gefahr, durch einseitige Quellenlagen oder algorithmische Lernprozesse verzerrte Bewertungen zu erzeugen. So können etwa prominente Einzelereignisse oder eine Vielzahl an Dokumenten zu einem einzelnen Thema überbetont werden. Daher bestand eine zentrale Aufgabe in einem kritischen Abgleich der Trendbeschreibungen mit dem breiteren Diskursfeld. In unserem Fallbeispiel wurde durch einen „Human-after-the-Loop“-Ansatz die Trendstruktur abschließend auf systematische Verzerrungen überprüft. Dadurch konnten stark einseitige Beschreibungen identifiziert und übertriebene Narrative relativiert werden.

Insgesamt lassen sich für den Horizon Scanning-Prozess ähnliche Rahmenbedingungen beschreiben, die auch für den Einsatz von KI-Tools generell gelten: Die Stärken des KI-Einsatzes liegen vor allem in der Effizienz der Datenerhebung, der Detektion inhärenter Muster und der Fähigkeit, große Datenmengen in kurzer Zeit zu verarbeiten. Die Schwächen hingegen betreffen vor allem Fragen der Datenherkunft und -qualität, inhaltlichen Relevanzbewertung und potenzieller Verzerrungen. Durch die vielfältige Mensch-KI-Interaktion entlang der vier dargestellten Modi konnte jedoch ein robuster Analyseprozess gestaltet werden, der die jeweiligen Schwächen der KI systematisch kompensiert und ihre Stärken gezielt zur Wirkung bringt. Damit wird ein nachhaltiger und verantwortungsvoller Einsatz intelligenter Systeme in der strategischen Vorausschau ermöglicht

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die vorliegende Fallstudie unterstreicht das hohe Potenzial datengestützter Vorausschau im Zusammenspiel mit modernen KI-Technologien für komplexe analytische Aufgaben [NKS24]. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Wirksamkeit entsprechender Systeme nicht allein von technologischen Fortschritten, sondern maßgeblich von ihrer strategischen Einbettung, methodischen Fundierung und der aktiven Rolle menschlicher Entscheidungsträger abhängt. Im vorliegenden

Beitrag haben wir den konzeptionellen Ansatz für kollaborative Mensch-KI-Interaktion für datengestützte Vorausschau gezeigt und ein Fallbeispiel beschrieben, in dem dieser aktuell umgesetzt wird. Aus den bisherigen Erkenntnissen lassen sich weitere Belege für bekannte methodische Herausforderungen, übergeordnete Schlussfolgerungen sowie Perspektiven für die Weiterentwicklung ableiten:

So ist eine etablierte Rahmenbedingung, dass trotz fortschreitender Automatisierung menschliche Expert*innen zum jetzigen Zeitpunkt unverzichtbar für die Interpretation, Kontextualisierung und Bewertung strategisch relevanter Informationen im Horizon Scanning-Prozess bleiben. KI-Anwendungen können nicht die Analyse selbst übernehmen, sondern diese nur unterstützen. Vorteile bieten sich etwas durch die Sammlung von Daten, die Erkennung emergenter Muster und die strukturierte Aufbereitung in Zeitverläufen. Eine kollaborative Mensch-KI-Interaktion sollte anschließend auf transparenten Interventionen in diesem Prozess und der Nutzung komplementärer Fähigkeiten zwischen Mensch und KI basieren. Um Akzeptanz und Vertrauen in KI-Systeme zu fördern, ist insbesondere eine schrittweise Einführung essenziell, die Raum für organisatorisches Lernen und partizipative Ausgestaltung des Forschungsdesigns lässt.

Eine weitere bekannte Herausforderung ist auch, dass große Datenmengen („Big Data“) nicht automatisch zu belastbaren Analyseergebnissen führen. Entscheidend ist die Qualität der Datenauswertung: Nur wenn Informationen geprüft, eingeordnet und im Kontext bewertet werden, lassen sich relevante und valide Erkenntnisse gewinnen. Daher sollten Verfahren wie das Erkennen und Reduzieren von Verzerrungen (De-Biasing) sowie die Bereinigung unzuverlässiger Quellen feste Bestandteile jeder datengestützten Vorausschau sein. Um die Nachvollziehbarkeit zu erhöhen, ist es zudem wichtig, diese Methoden klar zu beschreiben und mit konkreten Beispielen aus der Praxis zu veranschaulichen.

Die Fallstudie zeigt ebenfalls, dass die Kombination methodischer Ansätze zu den besten Ergebnissen führen. Klassifikationsaufgaben wie beispielsweise die Einordnung von Dokumenten in eine Trendtaxonomie profitieren von maschinellem Lernen. Statistische Verfahren liefern robuste Informationen für Expert*innen zur Validierung oder zum Abgleich der Dokumente mit historischen Entwicklungen. Generative KI eignet sich ebenfalls für die explorative Textanalyse, bei denen Themencluster erschlossen werden sollen. Die Wahl der Methode sollte kontext- und phasenspezifisch erfolgen.

6 Limitationen und Ausblick

Das dargestellte Fallbeispiel zeigt, dass kollaborative Mensch-KI-Interaktion ein wichtiger Entwicklungsschritt für datengestützte Vorausschau sein kann. Der Einsatz von KI-Tools ist jedoch weiterhin durch bestehende methodische Herausforderungen limitiert. So bleibt beispielsweise die Kontextualisierung der Daten eine manuelle Aufgabe, die weiterhin zeit- und kostenintensiven menschlichen Aufwand benötigt. Zudem bestehen Grenzen in der Datenanalyse unter anderem darin, dass die Leistungsfähigkeit von KI-gestützter Vorausschau strukturell durch den Zugang zu qualitativ hochwertigen Daten limitiert ist. Viele wissenschaftliche und journalisti-

sche Quellen sind durch fehlende Schnittstellen oder Bezahlschranken für ein Horizon Scanning schlecht erreichbar. Das erschwert den Aufbau der Datenbasis. Dies betrifft insbesondere Organisationen ohne institutionelle Zugänge. Solche strukturellen Beschränkungen machen es erforderlich, die Grenzen der Wissensquellen zu reflektieren und methodische Verschränkungen zu fördern. In diesem Zuge könnten interdisziplinäre Open Innovation Ansätze weiter explorediert werden, um community-getrieben blinde Flecken zu bearbeiten. Datenlücken können so systematisch identifiziert und durch alternative Erhebungsverfahren ausgeglichen werden (z. B. Expert*innen-Interviews). Darin liegt ein großes Potential, um den Ansatz zu einem umfassenden Monitoring-System für emergente Technologien weiterzuentwickeln.

Wir möchten betonen, dass eine eingehende Diskussion und Bewertung der Qualität der gesammelten Trends außerhalb des Rahmens dieses Beitrags lagen. Wir haben uns bei der Analyse darauf konzentriert, die Anwendbarkeit des Human-in-the-Loop-Ansatzes für den Horizon Scanning-Prozess zu testen. Dieser ist transferierbar auf konkrete Anwendungsfälle in der Wissenschaftskommunikation, wie beispielsweise die Analyse von zukunftsgerichteten Aussagen zu Pandemien [siehe VRW+22].

Literatur

- [Ans75] ANSOFF, H. I.: Managing Strategic Surprise by Response to Weak Signals. *California Management Review*, (18)2, 1975, S. 21–33
- [BHB+25] BIEL, S.; HAHN, A.; BILGRAM, V.; ROGERS, H.: From Hybrid to AI-First Innovation Management. *IEEE Engineering Management Review*, 2025, S. 1–11
- [BPT+20] BONGIORNO, D. L.; PRAKASAN, N.; TRUSWELL, J.; POSADOWSKI, M.; WALSH, J.: AiCE: automating horizon scanning for the detection of emerging technologies: 2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), 2020, S. 1751–1756
- [Cuh20] CUHLS, K.: Horizon Scanning in Foresight – Why Horizon Scanning is only a part of the game. *FUTURES & FORESIGHT SCIENCE*, (2)1, 2020, e23
- [GGW+22] GEURTS, A.; GUTKNECHT, R.; WARNEKE, P.; GOETHEER, A.; SCHIRRMEISTER, E.; BAKKER, B.; MEISSNER, S.: New perspectives for data-supported foresight: The hybrid AI-expert approach. *FUTURES & FORESIGHT SCIENCE*, (4)1, 2022, e99
- [GW22] GRUETZEMACHER, R.; WHITTLESTONE, J.: The transformative potential of artificial intelligence. *FUTURES*, (135), 2022, S. 102884
- [HGF+19] HIMANEN, L.; GEURTS, A.; FOSTER, A. S.; RINKE, P.: Data-Driven Materials Science: Status, Challenges, and Perspectives. *Advanced Science*, (6)21, 2019, S. 1900808
- [JFJ+23] JUNG, H.; FISCHER, D.; JOACHIM, V.; GROTH, S.; HEFFETER, F.: AI in Strategic Foresight – Evaluation of ChatGPT, BARD and Perplexity: Event Proceedings. LUT Scientific and Expertise Publications, Salzburg, 2023
- [KAH15] KERSTIN CUHLS; ANNELIEKE VAN DER GIESSEN; HANNES TOIVANEN: Models of Horizon Scanning - How to integrate Horizon Scanning into European Research and Innovation Policies. Fraunhofer ISI, TNO, VTT, 2015
- [KKD23] KÖDDING, P.; KOLDEWEY, C.; DUMITRESCU, R.: Scenario-based Foresight in the Age of Digital Technologies and AI: New digital work: Digital sovereignty at the workplace. Springer International Publishing, Cham, 2023, pp. 51–67
- [LBD+24] LOOS, S.; BICKERT, F.; DOTZEL, M.; TUTSCHKU, C. K.; KAISER, S.: Potenziale und Bedarfe des Quantencomputing-Ökosystems, 2024

[MG18] MÜHLROTH, C.; GROTTKE, M.: A systematic literature review of mining weak signals and trends for corporate foresight. *Journal of Business Economics*, (88)5, 2018, S. 643–687

[NKS24] NATH, S.; KATOCH, O. R.; SEHGAL, S.: Revolutionizing Research in Social Sciences: The Transformative Potential of ChatGPT. *Asian Journal of Education and Social Studies*, (50)3, 2024, S. 209–214

[PBB+12] PALOMINO, M. A.; BARDSLEY, S.; BOWN, K.; LURIO, J. DE; ELLWOOD, P.; HOLLAND-SMITH, D.; HUGGINS, B.; VINCENTI, A.; WOODROOF, H.; OWEN, R.: Web-based horizon scanning: concepts and practice. *foresight*, (14)5, 2012, S. 355–373

[SAA+12] SUTHERLAND, W. J.; ALLISON, H.; AVELING, R.; BAINBRIDGE, I. P.; BENNUN, L.; BULLOCK, D. J.; CLEMENTS, A.; CRICK, H. Q. P.; GIBBONS, D. W.; SMITH, S.; RANDS, M. R. W.; ROSE, P.; SCHARLEMANN, J. P. W.; WARREN, M. S.: Enhancing the value of horizon scanning through collaborative review. *Oryx*, (46)3, 2012, S. 368–374

[SGW20] SCHIRRMEISTER, E.; GÖHRING, A.-L.; WARNKE, P.: Psychological biases and heuristics in the context of foresight and scenario processes. *FUTURES & FORESIGHT SCIENCE*, (2)2, 2020, e31

[SSM+] SCHMIDT, L.; SHARMA, O.; MARSHALL, C.; MORAL, S. G. G.: Horizon Scans can be accelerated using novel information retrieval and artificial intelligence tools

[SSM+25] SCHMIDT, L.; SHARMA, O.; MARSHALL, C.; MORAL, S. G. G.: Horizon Scans can be accelerated using novel information retrieval and artificial intelligence tools, arXiv, 2025

[TT10] TASHAKKORI, A.; TEDDLIE, C.: *SAGE Handbook of Mixed Methods in Social & Behavioral Research*. SAGE, 2010

[Ves25] VESNIC-ALUJEVIC, L.: Augmented foresight: The transformative power of generative AI for anticipatory governance. Briefing. Brussels, 2025

[VRW+22] VIGNOLI, M.; RÖRDEN, J.; WASSERBACHER, D.; KIMPELER, S.: An Exploration of the Potential of Machine Learning Tools for Media Analysis to Support Sense-Making Processes in Foresight. *Frontiers in Communication*, (7), 2022, S. 750614

Autoren

Felix Bickert ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Center for Responsible Research and Innovation tätig. Dort beschäftigt er sich mit Methoden der Zukunftsforschung im Bereich von emergenten Technologien sowie dem Weg zu wünschbaren Zukünften. Während seines Studiums an der Freien Universität Berlin und der Universität Hamburg befasste er sich u. a. mit Zukunftsbildern in der deutschen Hightech-Strategie 2025. Er arbeitete von 2019 bis 2022 im Hauptstadtbüro der Fraunhofer Zentrale in der Abteilung Wissenschaftspolitik und war davor bei internationalen Firmen im Bereich Mode, Design und Architektur beschäftigt.

Dr. Moritz Julian Maier ist als Senior Researcher am Center for Responsible Research and Innovation tätig. Dort beschäftigt er sich mit partizipativen und strategischen Vorausschauprozessen im Bereich der Emerging Technologies sowie damit verbundenen Transformationsprozessen. Während seiner Promotion an der International Max-Planck-Research-School mit Forschungsaufenthalt an der University of Toronto erforschte er unter anderem die unterschiedlichen Dimensionen prosozialen Verhaltens. Moritz Maier arbeitet seit 2020 bei Fraunhofer und war davor bei einer international tätigen Unternehmensberatung im Bereich der Digitalisierungs- und Transformationsbegleitung beschäftigt.

Simone Kaiser ist Leiterin des Center for Responsible Research and Innovation (CeRRI) des Fraunhofer IAO und führt das Team „Gesellschaftliche Trends und Technologie“. Gemeinsam

mit ihrem Team identifiziert sie gesellschaftliche Wünsche und Ansprüche an neue Technologien und in Transformationsprozessen. Für Akteure aus Wirtschaft, Forschung und Politik entwickelt sie neue Prozesse und Methoden, um Innovationen verantwortlich zu gestalten und sie für die Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen nutzbar zu machen. Simone Kaiser ist seit 2010 bei Fraunhofer, davor arbeitete sie vier Jahre im Beratungsbereich Innovation, Technologie und Bildung der Prognos AG in Berlin. Sie war von 2020 bis 2022 Co-Leiterin der AG Ethik der Initiative D21 und ist Mitglied des Scientific Advisory Board des World Fund. Simone Kaiser studierte Politik, Soziologie und VWL an den Universitäten Tübingen und Magdeburg.

Prof. Dr. Katharina Hölzle ist seit April 2022 Professorin und Leiterin des Instituts für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart sowie Institutsleiterin des Fraunhofer Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO. Zuvor war sie Professorin am Hasso-Plattner-Institut der Universität Potsdam. Seit April 2023 ist sie Technologiebeauftragte der Wirtschaftsministerin Baden-Württembergs. Frau Prof. Hölzle war von 2018 bis 2022 stellvertretende Vorsitzende der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) sowie Mitglied des Hightech-Forums der Bundesregierung. Sie ist Mitglied bei acatech, der deutschen Akademie der Technikwissenschaften. Ihre Forschungsgebiete sind Technologie- und Innovationsmanagement, Arbeitswissenschaft und die digitale Transformation. Ein Schwerpunkt ist dabei immer die Interaktion Mensch – Technologie – Organisation und die Bedeutung des Menschen in der Technologieentwicklung und -anwendung.

Session III

Anwendung einer Systematik für Monitoring zur Bedarfsvalidierung zwischen Vorausschau und Produktentwicklung im Projekt SofDCar

***Carsten Thümmel¹, Maximilian Kuebler¹, Andreas Siebe¹, Tobias Düser¹,
Albert Albers¹***

¹ IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT, carsten.thuemmel@kit.edu,
maximilian.kuebler@kit.edu, andreas.siebe@kit.edu, tobias.dueser@kit.edu,
albert.albers@kit.edu

Zusammenfassung

In der strategischen Planung von zukünftigen Produkten wird zunehmend strategische Vorausschau eingesetzt. Durch die Entwicklung von Szenarien wird ein Überblick über alternative Entwicklungen gewonnen und durch die Einbindung von Trends und Prognosen eine Einschätzung getroffen, in welche Richtung sich die Zukunft entwickelt. Bestehende Ansätze helfen, die Ergebnisse der Vorausschau in die laufende Produktplanung zu integrieren und bspw. zukünftig relevante Produkteigenschaften abzuleiten. Der Entwicklungsverlauf in der Zukunft bleibt jedoch weiterhin ungewiss. Um sich dieser permanent existierenden Unsicherheit während der Produktentwicklung zu begegnen, wurde eine Systematik zur kontinuierlichen Integration von Vorausschau in den Produktentstehungsprozess entwickelt, welche auf dem Konzept des Monitorings basiert. Diese soll die laufenden Planungen kontinuierlich gegen Abweichungen in der Zukunftsentwicklung absichern und auf Handlungsbedarfe hinweisen. Die Systematik besteht aus drei übergeordneten Kernaktivitäten. Zunächst werden in der Vorbereitungsaktivität der Umfang sowie die einzusetzenden Informationsquellen und das Expertenteam definiert. Die nachfolgende Metrikaktivität ist zweigeteilt. In einer Vorausschauanalyse werden vorhandene Ergebnisse aus vorangegangenen Vorausschauaktivitäten und dem Zielsystem der Produktentstehung analysiert und bewertet, was in der Bildung geeigneter Indikatoren mündet. In einem parallelen Strang wird das Umfeld gescannt und identifizierte Nachrichten zu relevanten Informationen verdichtet. Anhand einer Bewertung werden Indizien gebildet, welche mit den Indikatoren aus dem ersten Strang vernetzt werden. Durch Grenzwertbestimmung wird die kontinuierliche Überwachung des Umfelds in der abschließenden Monitoringaktivität vorbereitet, deren Überschreitung gegensteuernde Maßnahmen auslöst. In diesem Beitrag wird die Systematik anhand von Daten aus dem Projekt SofDCar angewendet. Ziel ist die Überprüfung der Anwendbarkeit sowie das Aufdecken von Potenzialen zur Weiterentwicklung. Anhand vorliegender Daten des Projekts in Form von Kundenumfeld- sowie Produktszenarien für softwarebasierte Fahrzeuge werden Indikatoren abgeleitet und durch ein KI-gestütztes Scanning Indizien aus der aktuellen Umfeldentwicklung herausgearbeitet.

Schlüsselworte

Methode, Monitoring, Produktentstehungsprozess (PEP), Szenarien, Validierung, Vorausschau, Zukunftsmanagement

Application of a Systematic Monitoring Approach for Needs Validation Between Foresight and Product Development in the SofDCar Project

Abstract

In the strategic planning of future products, strategic foresight is increasingly being utilized. By developing scenarios, an overview of alternative developments is created. With the use of trends and prognoses, an assessment is made regarding the likely direction of future developments. Existing approaches help incorporate the results of foresight into ongoing product planning, for example by deriving product features that will be relevant in the future. However, the course of future developments remains uncertain. To address this ever-present uncertainty during product development, a systematic approach has been developed for the continuous integration of foresight into the product engineering process, based on the concept of monitoring. This approach is intended to continuously safeguard current planning against deviations in future developments and to highlight the need for action.

The methodology consists of three overarching core activities. First, during the preparation activity, the scope, information sources to be used, and the expert team are defined. The subsequent metric activity is divided into two parallel strands. In a foresight analysis, the existing results from previous foresight activities and the system of objectives of product development are analyzed and evaluated, leading to the creation of suitable indicators. In the parallel strand, the environment is scanned and the information obtained is condensed into relevant indications. Based on an evaluation, signals are generated and then linked with the indicators from the first strand. By defining thresholds, the final monitoring activity is prepared to enable continuous environmental observation. If a threshold is exceeded, a trigger for counteracting measures is activated.

This approach is applied using data from the SofDCar project. The aim is to assess its applicability and identify potential areas for further development. Based on the project data – comprising customer-environment, and product scenarios for software-based vehicles – indicators are derived and signals from current environmental developments are extracted, in part using AI-supported scanning methods.

Keywords

Foresight, future management, method, monitoring, product engineering process (PEP), scenarios, validation

1 Einleitung

Technologische Entwicklungen, sich verändernde Kundenbedürfnisse, neue Geschäftsmodelle und regulatorische Anforderungen führen zu einer hohen Unsicherheit in der Produktplanung. Besonders im Kontext weit in der Zukunft liegender oder langlebiger Produkte und Systeme ist eine vorausschauende und flexible Produktentwicklung unerlässlich. Strategische Vorausschau – etwa durch Szenarien, Trendanalysen oder Prognosen – bietet die Möglichkeit, potenzielle Zukunftsentwicklungen frühzeitig zu erkennen. In der Praxis bleibt deren Nutzung jedoch häufig auf frühe Planungsphasen beschränkt. Eine kontinuierliche Verbindung zwischen Vorausschau und dem Produktentstehungsprozess (PEP) fehlt, obwohl dies entscheidend wäre, um Produkte auch während ihrer Entwicklung und Nutzung an sich verändernde Rahmenbedingungen anpassen zu können. [Wei25]

In der vorliegenden Arbeit wird daher ein hierfür im Kontext des übergreifenden Forschungsvorhabens entwickelter und bereits publizierter Ansatz exemplarisch angewendet, der Vorausschau systematisch mit der Produktentwicklung verknüpft und ein kontinuierliches Monitoring anhand von Indikatoren ermöglicht [TSS+25]. Als Anwendungskontext dient das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Forschungsprojekt Software-Defined Car (SofDCar). Es bietet mit seiner Fokussierung auf Digitalisierung, Updatefähigkeit und neue Fahrzeugkonzepte eine geeignete Plattform, um den Ansatz unter realitätsnahen Bedingungen zu durchlaufen.

Die Arbeit verfolgt das Ziel, die Praxistauglichkeit des entwickelten Ansatzes zu überprüfen, Verbesserungspotenziale zu identifizieren und Empfehlungen für eine methodische Weiterentwicklung zu formulieren. Damit soll ein Beitrag geleistet werden, um strategische Vorausschau wirksam in die Produktentwicklung zu integrieren und Unternehmen in die Lage zu versetzen, ihre Produkte robuster, flexibler und zukunftsfähiger zu gestalten.

2 Stand der Forschung

2.1 Innovationsverständnis und Produktentstehung

Der Produktentstehungsprozess (PEP) ist ein zentraler Bestandteil des Produktlebenszyklus. Er umfasst sämtliche Schritte von der ersten Idee und Planung über die Produktentwicklung bis hin zur Entwicklung des Produktionssystems und dem Produktionsstart. Eine vorausschauende, systemorientierte Entwicklung bildet dabei die Grundlage für zukünftige Innovationen [AG12]. Innovation wird als die retrospektiv erfolgreiche Umsetzung einer technischen Erfindung in ein marktfähiges Produkt verstanden [Sch39]. Albers et al. [AHW+18] erweitern dieses Verständnis um das Konzept des Produktprofils – ein Modell zur Beschreibung von Bedürfnissituativen. Es dient dazu, den Lösungsraum für die Produktgestaltung zu definieren und die Nutzenpotenziale für Anbieter, Kunden und Anwender für die Validierung zugänglich zu machen. In Übereinstimmung mit Patnaik und Becker [PB99] wird betont, wie wichtig es ist, sich in frühen Phasen auf die Bedürfnisidentifikation zu konzentrieren, bevor konkrete Lösungen erarbeitet werden, um eine Offenheit für unterschiedliche Lösungswege zu bewahren.

Mit dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers et al. [AKR+22] kann die Entwicklung von Produkten und Systemen in Generationen und auf Basis von Referenzen beschrieben werden. Produkte werden hierbei als Systeme verstanden, die in unterschiedlichen Entwicklungsstadien gleichzeitig bearbeitet werden. Elemente des Referenzsystems werden durch Übernahme-, Ausprägungs- und Prinzipvariation auf das in Entwicklung befindliche System übertragen. [AKR+22] Ergänzend wurde ein Ebenenmodell zur Beschreibung der Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen Produkteigenschaften, Produktfunktionen und Subsystemen entwickelt [AHH+18], das insbesondere bei der Spezifikation von Produktanforderungen eine wichtige Rolle spielt.

Produktentwicklung kann als ein kontinuierliches Zusammenspiel von Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem verstanden werden [Rop75]. Auf dieser Grundlage wurde das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) von Albers et al. [ARB+16] entwickelt, das den PEP mithilfe von Basis- und Kernaktivitäten in mehreren Phasen beschreibt. Neben dem Produkt selbst werden dabei auch mehrere Produktgenerationen, das zugehörige Produktionssystem, strategische Aspekte und das Validierungssystem auf unterschiedlichen Ebenen berücksichtigt.

2.2 Strategische Vorausschau in der Produktentstehung

Lange Entwicklungszyklen, die durch iterative Schleifen geprägt sind, sowie das Streben nach innovativen Produkten zählen zu den Hauptgründen für den Einsatz strategischer Vorausschau im PEP [Gau19]. Ursprünglich wurde strategische Vorausschau häufig als separater Prozess betrachtet, wird jedoch zunehmend in den PEP einbezogen [Mül08].

Der Begriff der strategischen Vorausschau stammt aus dem Bereich des Zukunftsmanagements, dessen Ziel es ist, Unternehmen in die Lage zu versetzen, schnell und adaptiv auf zukünftige Veränderungen zu reagieren [Wes06]. Dabei wird je nach Zeithorizont zwischen operativer, taktischer und strategischer Ebene unterschieden. Diese Ebenen lassen sich mit zunehmendem Zeithorizont verschiedene Instrumente der Vorausschau zuordnen: Prognosen (kurzfristig), Trends (mittelfristig) und Szenarien (langfristig) [Sie18].

Szenarien zeigen alternative, plausible Zukunftsentwicklungen auf. Im Gegensatz zu Trends und Prognosen, die tendenziell lineare Entwicklungen beschreiben, zeichnen sich Szenarien durch eine vernetzte und zukunftsoffene Denkweise aus [FS11]. Die Szenariotechnik nach Gausemeier et al. [GFS98] gliedert sich in fünf Schritte: Ausgehend von einer Analyse des definierten Szenariofelds werden Einflussfaktoren identifiziert und bewertet. Daraus ergibt sich eine reduzierte Menge an Schlüsselfaktoren, für die jeweils alternative Entwicklungspfade entlang zweier Dimensionen Projektionen formuliert werden. Durch die Kombination einzelner Projektionen dieser Schlüsselfaktoren entstehen konsistente Szenarien, die in einer Zukunftslandkarte visualisiert und beschrieben werden. Im abschließenden Szenario-Transfer können daraus strategische Maßnahmen abgeleitet werden [Gau19, GFS98, Sie18].

Über die strategische Unternehmensausrichtung hinaus existieren Ansätze, um Szenarien zur Ableitung zukünftiger Produkteigenschaften für den PEP zu nutzen. Thümmel et al. [TSK+22] unterscheiden hier zwischen einer zukunftsorientierten (an erwarteten Entwicklungen ausge-

richteten) und einer zukunftsrobusten (gegenüber unterschiedlichen Szenarien stabilen) Produktgestaltung. Meyer-Schwickerath [Mey14] untersuchte die Verknüpfung von Szenariotechnik, strategischer Frühaufklärung und dem PEP im Kontext der Aktivitäten des iPeM und zeigte auf, wie Vorausschau systematisch über das Zielsystem in den PEP integriert werden kann. Albers und Dumitrescu [ADM+18] betonen die Notwendigkeit eines methodischen Brückenschlags zwischen abstrakten Zukunftsbildern und konkreten technischen Teilsystemen.

Einen darauf aufbauenden Ansatz entwickelten Albers et al. [AMS+22] zur Ableitung von Produktprofilen und zukünftigen Produkteigenschaften auf Basis strategischer Vorausschau. Die ermittelten Eigenschaften werden u. a. mit Hilfe des Kano-Modells hinsichtlich ihrer Relevanz in zukünftigen Nutzungskontexten bewertet. Eigenschaften, die auch unter verschiedenen Szenarien zur Kundenzufriedenheit beitragen, gelten als zukunftsrobust und bilden eine fundierte Basis für das Zielsystem des PEP [Mey14]. Ein weiterer aktueller Ansatz von Kübler und Schuster et al. [KSS+23] fokussiert auf die vorausschauende Identifikation veränderter Produkteigenschaften in Bezug auf geplante Upgrades und Updates [KTS+23]. Auch hier erfolgt die Integration strategischer Vorausschau in den PEP, allerdings mit einem stärkeren Fokus auf die dynamische Weiterentwicklung bestehender Produktgenerationen mittels Upgrades und Updates. Diese werden beschrieben als Modifikation eines Systems durch Verbesserung oder Funktionsergänzung unter sich ändernden Randbedingungen [ADK+23].

2.3 Monitoring in der Vorausschau und Produktentstehung

Monitoring bezeichnet die „gezielte kontinuierliche Überwachung von bestimmten Abschnitten und Objekten eines Systems zur Erfassung von Informationen über Aktivitäten und Veränderungen“ [Sie07]. Es ist eine etablierte und grundlegende Tätigkeit in Unternehmen und wird im PEP etwa zur Beobachtung des Status von Forschung, Entwicklung oder Produktion eingesetzt [GKS+03, GV06]. Auch im Kontext der strategischen Vorausschau spielt Monitoring eine zentrale Rolle. Angesichts der hohen gesellschaftlichen Dynamik ist es notwendig, relevante Veränderungen im Umfeld systematisch zu beobachten. Monitoring ist integraler Bestandteil sowohl des Szenariocontrollings als auch des Trendmanagements in der strategischen Frühaufklärung. Es trägt direkt zur Anpassung und Weiterentwicklung der Schlüsselfaktoren bei, auf denen Szenarien basieren. Im Szenariocontrolling werden die für die Szenarien relevanten Zukunftsbereiche fortlaufend analysiert. Ziel ist es, Veränderungen im Umfeld frühzeitig zu erkennen und deren Einfluss auf die ursprünglich eingeschätzte Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarien zu bewerten. Das Trendmanagement hingegen richtet sich auf nicht antizipierte Entwicklungen. Es werden bestehende Trends beobachtet und analysiert – aber ebenso neu auftretende, potenziell disruptive Trends. Veränderungen können bei Bedarf in bestehende Szenarien integriert werden [FS16].

Eine Analyse verschiedener Methoden zur Szenarioentwicklung zeigt, dass Einflussfaktoren und Schlüsselfaktoren als zentrale Elemente des Monitorings fungieren können. In einer anschließenden Untersuchung zu bestehenden Monitoring-Ansätzen wurde jedoch ein deutlicher methodischer Bedarf im PEP identifiziert: Es fehlen geeignete, systematisch anwendbare Methoden zur Integration von Monitoring [TSR+23, TKS+23]. Um diesem Defizit zu begegnen, haben Albers et al. [ATS+24] ein kontextspezifisches Verständnis von Monitoring im Rahmen

des PEP vorgeschlagen. Hier wird Monitoring als Bestandteil der Validierung verstanden: Es zielt auf die gezielte Informationsgewinnung zu zuvor identifizierten, relevanten Indikatoren für zukünftige Umfeldentwicklungen des zu entwickelnden Systems ab. Eine kontinuierliche Beobachtung während der Produktentwicklung soll dabei helfen, generationenübergreifende Veränderungen frühzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen einzuleiten [ATS+24, Wei25]. In Bild 1 wird dieser Zusammenhang veranschaulicht.

Um die Produktausrichtung mit den Anforderungen der Zukunft abzulegen und mögliche Abweichungen festzustellen, kann die Verortung von Produktprofilen im Zukunftsraum durch den Abgleich mit äquivalenten Szenarien erfolgen [TKS+24]. Ein erster übergreifender Ansatz zur kontinuierlichen Integration von Vorausschau in den PEP wurde mit dem von Thümmel et al. [THS+24] entwickelten fünfstufigen Vorgehensmodell vorgestellt. Es bildet eine strukturierte Grundlage für die fortlaufende Einbindung von Monitoring in strategische und operative Entwicklungsprozesse. Ein ergänzendes Beschreibungsmodell zeigt einerseits die Ableitung relevanter Informationen und Indizien aus Nachrichten auf und andererseits die Einbindung verschiedener Instrumente der Vorausschau in Abhängigkeit des Reifegrads der Planung und Entwicklung im PEP [TUE+24]. Die beiden Modelle wurden zu einer zusammenhängenden Systematik weiterentwickelt und anhand eines Use-Cases initial angewandt [TES+25, TSS+25]. Das Vorgehen ist in Bild 3 dargestellt.

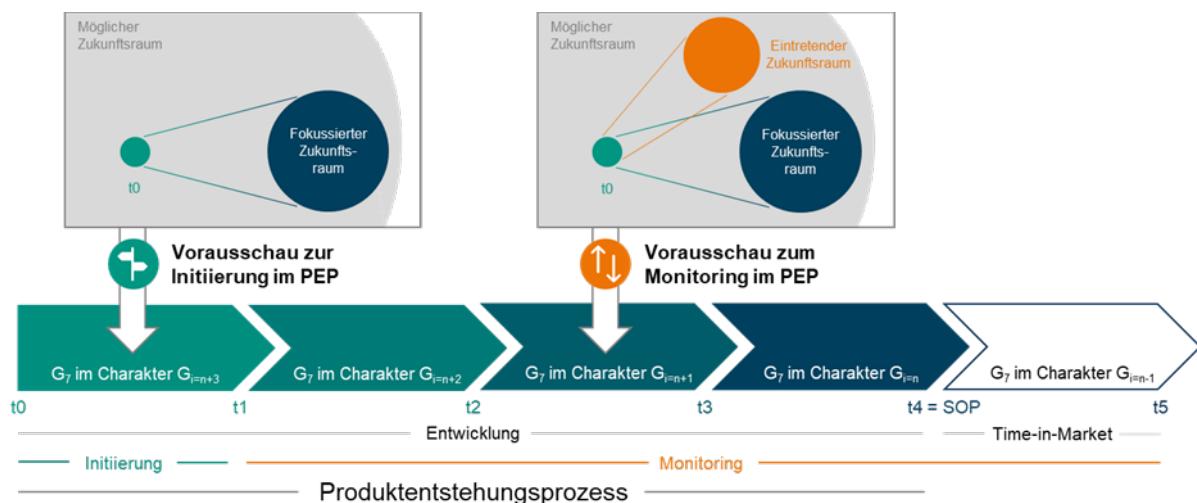


Bild 1: Fiktive, spezielle Produktgeneration G7 und ihr Charakter im zeitlichen Verlauf [ATS+24, Wei25]

3 Forschungsprofil und Methodisches Vorgehen

3.1 Forschungsprofil

Trotz vorhandener Ansätze zur Integration von strategischer Vorausschau in den Produktentstehungsprozess (PEP) fehlt bislang eine systematische und kontinuierliche Verknüpfung mit dem PEP über die initiale Planungsphase hinaus. Zwar wurden in der Literatur erste Verbindungen zwischen Vorausschau und PEP beschrieben, jedoch existiert keine etablierte Methodik

zur laufenden Validierung vorausschauend abgeleiteter Produktanforderungen und -eigenschaften im Kontext dynamischer Umfeldveränderungen. Hier setzt der identifizierte Forschungsbedarf an: Es bedarf einer methodischen Unterstützung, die eine kontinuierliche Überprüfung der Zukunftsrelevanz von Produkteigenschaften entlang der gesamten Entwicklung ermöglicht. Ein entsprechender Monitoring-Ansatz wurde von Thümmel et al. [TSS+25] durch die Kombination eines Beschreibungs- und Vorgehensmodells bereits konzipiert und initial angewendet.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Anwendung und Evaluierung dieses Ansatzes im Rahmen des Projekts Software-Defined Car (SofDCar). Im Fokus stehen die Überprüfung der praktischen Anwendbarkeit sowie die Identifikation von Potenzialen zur methodischen Weiterentwicklung und Optimierung des kontinuierlichen Monitorings im Zusammenspiel von Vorausschau und Produktentwicklung.

3.2 Methodisches Vorgehen

Zur Erreichung der beschriebenen Ziele werden die folgenden drei Forschungsfragen operationalisierend formuliert:

- 1) Welche Daten liegen aus dem Projekt SofDCar für die Anwendung des Ansatzes vor?
- 2) Wie kann der Ansatz anhand der Daten angewendet werden?
- 3) Welche Potenziale zur Weiterentwicklung ergeben sich aus der Anwendung des Ansatzes?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen und Erreichung der definierten Ziele wird ein methodisches Vorgehen gewählt, das sich an der Design Research Methodology (DRM) nach Blessing und Chakrabarti [BC09] orientiert. Diese gliedert den Forschungsprozess in vier grundlegende Phasen. Den Ausgangspunkt bildet die Klärung des Forschungsgegenstands, um ein fundiertes Verständnis für die theoretischen Grundlagen und den praktischen Kontext zu schaffen. Dazu werden relevante Vorarbeiten zum Monitoring-Ansatz sowie zum Projekt SofDCar analysiert. Darauf aufbauend erfolgt im Rahmen einer ersten deskriptiven Studie das Zusammentragen und die Aufbereitung projektspezifischer Daten, die für die Anwendung des Monitoring-Ansatzes notwendig sind. In einer kombinierten präskriptiven und zweiten deskriptiven Studie wird der Ansatz im Projektkontext angewendet. Dabei kommen unter anderem KI-gestützte Recherchetools sowie Trendanalyse-Werkzeuge zum Einsatz, um relevante Nachrichten und Informationen aus dem Umfeld systematisch zu identifizieren und auszuwerten. Aus der Anwendung werden Potenziale zur Verbesserung sowie Weiterentwicklung des Ansatzes analysiert.

4 Vorarbeiten im Projekt SofDCar

4.1 Überblick über das Projekt SofDCar

Die Forschung erfolgte anhand von Ergebnissen des dreijährigen Projekts Software-Defined Car (SofDCar), das Teil eines staatlich geförderten Forschungsprogramms ist und durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK – 19S21002) unterstützt wird. Insgesamt waren im Projekt, das von 2021 bis 2024 durchgeführt wurde, dreizehn Partner aus

Wissenschaft und Industrie beteiligt – überwiegend mit Hintergrund in der Softwareentwicklung und der Automobilbranche, aber auch aus dem Bereich der Produktentwicklung.

Übergreifendes Ziel des Projekts war die Entwicklung eines Fahrzeugkonzepts, das als Teil eines Netzwerks aus Fahrzeugen und umgebender Infrastruktur verstanden wird. Ein zentrales Anliegen bestand darin, die Lebensdauer von Fahrzeugen zu verlängern, indem durch Updates und Upgrades neue Funktionen hinzugefügt werden. Dadurch soll eine höhere Resilienz gegenüber technologischen Veränderungen erreicht und die Nachhaltigkeit gesteigert werden. Das Projekt war in vier thematische Schwerpunkte unterteilt, sogenannte Workstreams: (1) Data Loop, (2) Re-Deployment, (3) Digital Twin und (4) Demonstrators. Die in diesem Beitrag behandelten Inhalte sind dem Workstream 3 Digital Twin zugeordnet, der auf die zunehmenden und differenzierteren Kundenbedürfnisse sowie steigende Erwartungen an das Nutzungserlebnis eingeht. [Sof21, TFS+24]

4.2 Szenarien und abgeleitete Produkteigenschaften

Es wurden sieben Kundenumfeld-Szenarien mithilfe von 13 Schlüsselfaktoren anhand der Szenariotechnik nach Gausemeier et al. [GFS98] erstellt, die den möglichen Zukunftsraum für softwaredefinierte Fahrzeuge beschreiben [TFS+24]. Diese sind in Bild 2a dargestellt.

Für die Ableitung relevanter zukünftiger Produkteigenschaften wurde die systematische Vorgehensweise nach Albers et al. [AMS+22] durchgeführt. Dabei wurden bestehende Eigenschaften aktueller Fahrzeuge erfasst und mögliche zukünftige Eigenschaften aus den erstellten Szenarien abgeleitet, sowie anschließend hinsichtlich ihres Entwicklungspotenzials auf Zukunftsrobustheit und Innovationsfähigkeit bewertet. Aus dieser Bewertung resultierte eine Priorisierung der Eigenschaften in kurz-, mittel- oder langfristig zu variiierende Merkmale, die in einem Portfolio dargestellt wurden. [TFS+24]

Für eine weiterführende Analyse wurde der Ansatz nach KUEBLER ET AL. [KSS+23] herangezogen, der den Fokus auf Upgradeability legt, um mit Veränderungen von Produkteigenschaften umzugehen. Hierzu wurden aktuelle Eigenschaften analysiert und in die Zukunft projiziert. Die Kombination dieser Projektionen ergab Produktszenarien, die im Rahmen einer Delta-Analyse mit den Kundenumfeld-Szenarien verglichen wurden. Die Daten stammen nicht direkt aus einem konkreten Unternehmensprojekt, weshalb sie als fiktives Fallbeispiel angesehen werden. Die Produktszenarien sind in Bild 2b aufgeführt. [TFS+24]

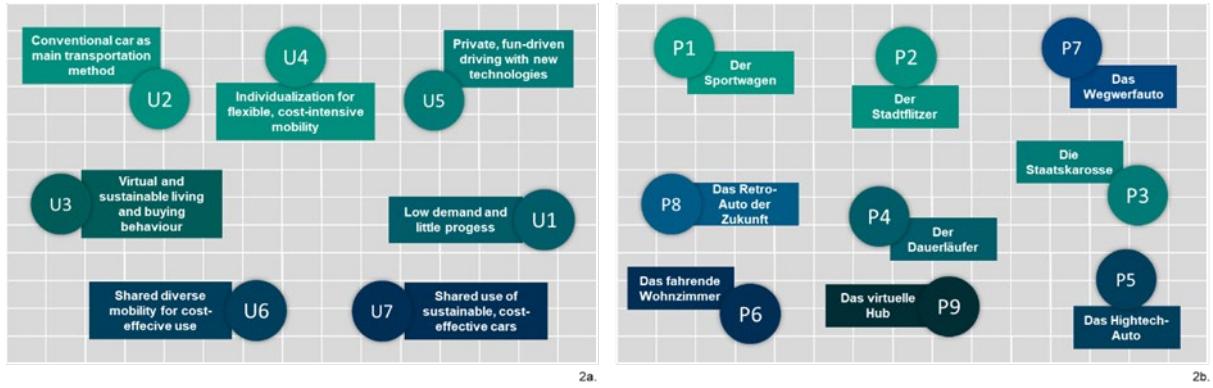


Bild 2: Landkarte der Zukunft für die Kundenumfeld- (a) und Produktszenarien (b) im Kontext des Projekts SofDCar [TFS+24, KTS+23]

5 Systematik für Monitoring zur Bedarfsvalidierung zwischen Vorausschau und Produktentwicklung

Das vorgestellte Vorgehensmodell von Thümmel et al. [TSS+25] bietet einen Rahmen zur Integration strategischer Vorausschau in den Produktentstehungsprozess (PEP). Ziel ist es, Produktmerkmale kontinuierlich im Hinblick auf technologische, marktbezogene und regulatorische Veränderungen zu beobachten, zu analysieren und zu validieren. Das Modell (siehe Bild 3) gliedert sich in drei miteinander verknüpfte Aktivitäten: Vorbereitung, Metrik und Monitoring, die iterativ miteinander verknüpft sind.

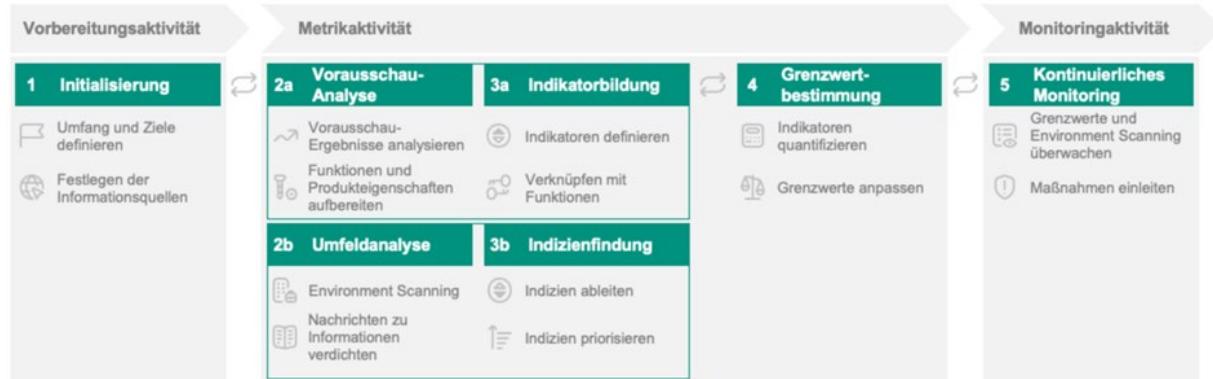


Bild 3: Vorgehensmodell der Gesamtsystematik [TSS+25]

In der Vorbereitungsaktivität werden Ziel, Beobachtungsumfang und Informationsquellen für das spätere Monitoring festgelegt. Diese können bei Bedarf noch im weiteren Verlauf angepasst werden. In der Metrikaktivität, welche in zwei parallele Stränge aufgeteilt ist, werden auf der einen Seite bestehende Erkenntnisse und Ergebnisse aus vorangegangenen Vorausschauaktivitäten zusammengetragen, bewertet und in messbare Indikatoren überführt. Auf der anderen Seite werden durch eine Umfeldanalyse schwache Signale aufgespürt und daraus relevante Informationen – Indizien – identifiziert, die das zu entwickelnde Produkt beeinflussen können. Anhand einer Verknüpfung der Indikatoren und Indizien können die Einflüsse der schwachen Signale zugeordnet und bewertet werden. Durch Definition von Grenzwerten wird festgelegt,

ab wann eingegriffen werden sollte. In der Monitoringaktivität werden die definierten Indikatoren und Grenzwerte überwacht und bei Bedarf angepasst. Durch kontinuierliche Umfeldanalyse werden Indizien gesucht und deren Einfluss auf die Produktentwicklung abgeschätzt.

Die notwendige Bewertung der Faktoren, wie bspw. Trends, Prognosen oder Informationen, erfolgt anhand eines einheitlichen Bewertungsschemas. Dieses lässt sich unterteilen in zwei grundlegende Kriterien:

- *Wahrscheinlichkeit (vorausschaugetrieben)*: bezieht sich auf makroökonomische, technologische und gesellschaftliche Veränderungen, die für das Produkt relevant sind
- *Relevanz (produktentwicklungsgetrieben)*: bewertet die Umsetzbarkeit und Integration der identifizierten Trends in bestehende Entwicklungsprozesse

Die Bewertung der beiden Kriterien erfolgt anhand von jeweils drei Unterkriterien, die auch in Bild 4 abgebildet sind. Die Wahrscheinlichkeit wird eingeschätzt anhand der Eintrittswahrscheinlichkeit, dem Zeithorizont und der Reichweite. Die Relevanz wird bewertet anhand der Chancen und Gefahren, dem Umsetzungsaufwand und dem Handlungsspielraum.

Wahrscheinlichkeit (W): Vorausschau getrieben			Relevanz (R): Produktentwicklung getrieben		
EW	ZH	RW	CG	UA	HS
0 unwahrscheinlich	0 irgendwann vielleicht	0 irgendwann vielleicht	0 betrifft uns nicht oder keine	0 keine Ressourcen binden oder keine	0 keiner vorhanden
1 zweifelhaft	1 > 4 Jahre	1 > 4 Jahre	1 geringe	1 geringe	1 geringer
2 möglich oder sehr wahrscheinlich	2 < 4 Jahre	2 < 4 Jahre	2 mittel bis hoch	2 mittel bis hoch	2 mittel bis hoch
3 nahezu sicher	3 Gegenwärtig	3 Gegenwärtig	3 sehr hoch	3 sehr hoch	3 freie Entwicklung
Wie wahrscheinlich ist es, dass der Schlüsselefaktor in der Zukunft sich ändert?	Innerhalb welches zeitlichen Rahmens wird die Veränderung voraussichtlich eintreten?	Wie stark wird der Faktor den Markt oder das Produkt beeinflussen?	Wie wichtig ist es, kurzfristig auf den Faktor zu reagieren?	Wie hoch ist der Aufwand, den Schlüsselefaktor zu berücksichtigen oder darauf zu reagieren?	Wie viel Spielraum in der Entwicklung habe ich noch und wie viel wurde bereits schon festgelegt?

Bild 4: Bewertungsschema [TSS+25]

Die bewerteten Faktoren lassen sich in einem Portfoliodiagramm einordnend darstellen. Dabei wird in die sechs Kategorien: I) Sofort handeln, II) Proaktiv aufgreifen, III) Beobachten und integrieren, IV) Beobachten, V) Beobachten und absichern sowie VI) Keine Ressourcen binden unterschieden. Grundlage der Aufteilung ist der Mittelwert $\mu \pm b$ mit der Standardabweichung σ für den Parameter b .

6 Anwendung des Ansatzes für Monitoring im Projekt SofDCar

Die Anwendung des Ansatzes erfolgt auf Basis der zuvor vorgestellten Ergebnisse aus dem Projekt SofDCar sowie des Ansatzes nach Thümmel et al. [TSS+25]. Daher werden in den folgenden Unterkapiteln die durchgeführten Aktivitäten beschrieben, sowie die Ergebnisse dargelegt.

6.1 Vorbereitungsaktivität

Als Ziel wird die Einschätzung der abgeleiteten Planungen festgelegt. Innerhalb des Projekts ist durch die begrenzte Projektlaufzeit keine kontinuierliche Überprüfung möglich, weshalb die Monitoringaktivität nur exemplarisch durchgeführt wird. Das restliche Vorgehen bleibt jedoch gleich und wird für einen mittleren bis langfristigen Zeithorizont, tendenziell früh im PEP angesetzt. Als Informationsquellen stehen die oben vorgestellten Ergebnisse der Vorarbeiten im Projekt SofDCar in Form von Kundenumfeld- und Produktszenarien für die Vorausschau-Analyse zur Verfügung. Zur Vorausschau- und Umfeldanalyse werden der Trendmanager von Trendone zur Identifikation aktueller Trends und ChatGPT-4o-mini für die Suche nach beispielhaften, relevanten Nachrichten herangezogen. Die Festlegungen sind in Bild 5 aufgeführt.

Ziel	Einschätzung der abgeleiteten Planungen
Beobachtungs-umfang	mittlerer bis langfristiger Zeithorizont, tendenziell früh im PEP
Informationsquellen	Ergebnisse aus Vorarbeiten im Projekt SofDCar, Trendmanager (Trendone), ChatGPT

Bild 5: Festlegungen in der Vorbereitungsaktivität

6.2 Metrikaktivität

6.2.1 Vorausschau-Analyse und Indikatorbildung

In den Sub-Aktivitäten 2a und 3a werden zunächst Ergebnisse aus der Vorausschau analysiert. Diese umfassen Szenarien mitsamt ihren Schlüsselfaktoren, Trends und Prognosen. Ebenso die aus der Vorausschau abgeleiteten Produkteigenschaften, die ebenfalls im Folgenden betrachtet werden.

Schlüsselfaktoren

Innerhalb der Metrikaktivität wurden zunächst die Schlüsselfaktoren der vorliegenden Kundenumfeld-Szenarien nach oben eingeführtem Bewertungsschema bewertet. Die drei Bewertungskriterien werden aufaddiert, sodass sich eine mögliche Spanne von 0 bis 9 für die Wahrscheinlichkeit und die Relevanz ergibt. Dies ist für alle Bewertungsschritte innerhalb des Ansatzes gleich. Die 13 Schlüsselfaktoren weisen fast alle eine mittlere Relevanz auf um einen Mittelwert von 5,7. Die Wahrscheinlichkeit wird unterschiedlicher eingeschätzt, mit breiterer Streuung. Durch die vergleichsweise geringe, durch die Szenario-Technik limitierte Anzahl an Faktoren im Vergleich zu bspw. Trends, wurde für das Portfolio eine vereinfachte Kategorisierung mit $b=0$ gewählt. Dadurch verringert sich die Anzahl der Kategorien von sechs auf vier. Im Beispiel ergibt sich eine besondere Aufmerksamkeit für die Schlüsselfaktoren *Technologischer Fortschritt, Politik, Wettbewerb* und *Finanzen*. Anhand dieser sollten primär Indikatoren gebildet werden. Die Bewertungen sowie das resultierende Portfolio ist in Bild 6 dargestellt.

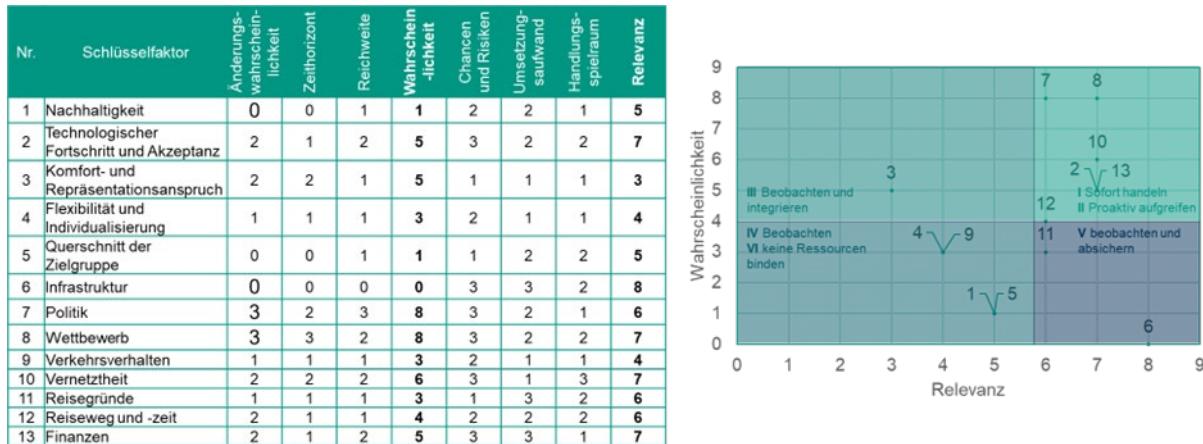


Bild 6: Auszug der Schlüsselfaktoren inkl. Bewertung sowie das zugehörige Portfolio

Trends und Prognosen

Die Trends wurden mit dem Trendmanager von Trendone mit den Suchbegriffen *software defined vehicle* und *automobil* gesucht und 20 Trends ausgewählt. Ergänzend wurde ChatGPT versuchsweise eingesetzt mit dem Promt „*was sind aktuelle trends bzgl. softwaredefinierte Fahrzeuge, die die physische produktentwicklung adressieren (Maschinenbau)*“‘, da die Trends aus dem Trendmanager überwiegend in Richtung Software ausgerichtet waren. Es wurden sieben Trends ergänzt, sodass insgesamt 27 Trends betrachtet wurden.

Die Prognosen wurden vollständig mithilfe von ChatGPT gesucht. Der Promt „*nenne mir aktuelle Prognosen und den zugehörigen Trend*“ wurde im Anschluss an die Trendsuche eingesetzt, sodass der Kontext bereits eingegrenzt war. Zu den 26 Prognosen wurden jeweils manuell die jeweiligen Trends als zusammenfassende Beschreibung der Prognose abgeleitet. Teilweise wurde der Vorschlag von ChatGPT übernommen.

In beiden Fällen, sowohl bei Betrachtung der Trends als auch der Prognosen, hat der Einsatz von ChatGPT schnell schlüssige Ergebnisse ergeben, die für die exemplarische Betrachtung als geeignet eingestuft wurden. Eine evaluierende Betrachtung der Inhalte hat jedoch nicht stattgefunden. Die Bewertung erfolgte analog zu den Schlüsselfaktoren. Durch die grundsätzlich unlimitierte Anzahl möglicher Trends, ist nun die Verwendung des vollständigen Portfolios sinnvoll. Ein Auszug der betrachteten Trends sowie das zugehörige Portfolio ist in Bild 7 dargestellt.

Nr.	Prognose	Abgeleiteter Trend	Abweichungs-wahrscheinlichkeit	Zeithorizont	Reichweite	Wahrscheinlichkeit	Chancen und Risiken	Umsetzungsaufwand	Handlungsspielraum	Relevanz
2	2023: ca. 20 % der verkauften Fahrzeuge gelten als "softwaredefiniert". 2030: > 90 % der Neufahrzeuge werden als SDVs konzipiert. (Quelle: Capgemini / McKinsey-Prognosen)	Anstieg des Anteils SDV am Gesamtmarktvolumen	3	1	1	5	3	2	3	8
3	2020: ca. 30 % der Fahrzeugkosten entfallen auf Elektronik/Software. 2030: > 50 % der Fahrzeugkosten werden durch Software & Elektronik verursacht. (Quelle: Roland Berger, Deloitte)	Anstieg der anteiligen Kosten durch Elektronik und Software	1	1	1	3	2	1	2	5
5	2023: ca. 30 % der Neufahrzeuge OTA-fähig. 2028: > 90 % der Fahrzeuge können Funktionen OTA aktualisieren. (Quelle: MarketsandMarkets, ABI Research)	OTA-Updates für Fahrzeuge gewinnen an Bedeutung	3	2	2	7	3	2	2	7

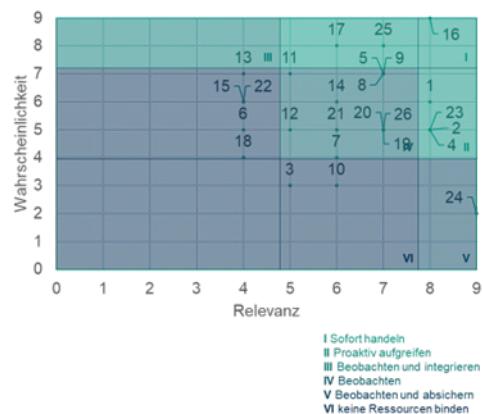


Bild 7: Auszug der Prognosen inkl. Bewertung sowie das zugehörige Portfolio

Indikatorbildung und Verknüpfung mit Produkteigenschaften

Anhand der Szenarien sowie zugehöriger Schlüsselfaktoren, der Trends und der Prognosen wurden 20 Indikatoren gebildet. Beispielsweise sind dies *Marktvolumen SDV-Software*, *Investitionen in SDV-Infrastruktur*, *Anzahl ECUs/Steuergeräte*, *Entwicklungszeit und die User Experience als Differenzierungsmerkmal*. Indikatoren können dabei sehr nah an den ursprünglichen Vorausschauergebnissen formuliert sein, sollten aber messbar sein bzw. entsprechende Datenquellen zugeordnet werden. Dies können unter anderem Geschäftsberichte, Wettbewerbsdaten aus Vergleichen oder Statistiken sein.

Die Produktfunktionen und -eigenschaften [KTS+23] wurden hinsichtlich Umsetzungsaufwand und Handlungsspielraum bewertet. Die reduzierte Bewertung mit nur zwei Kriterien begründet sich in der rein produktentwicklungsgetriebenen Sichtweise, ohne Aspekte der Vorausschau. Ein Auszug ist in Bild 8 dargestellt.

Nr.	Funktion/Eigenschaft	Beschreibung	Umsetzungsaufwand	Handlungsspielraum	Relevanz
1	Drehmomenterzeugung	Wie wird das Antriebsmoment erzeugt?	3	1	4
2	Drehmomentübertragung	Wie wird das Drehmoment an die Räder übertragen?	3	1	4
3	Fahrzeuggröße	Wie groß ist das Fahrzeug? Wie groß ist der Passagierraum, wie groß der Ladungs- und Designraum?	3	1	4
4	Fahrwerk	Ist das Fahrwerk sportlich, sicher/robust oder bequem ausgelegt?	2	2	4
5	Steuerung	Wie wird das Fahrzeug gesteuert?	3	1	4
6	Infotainment	Wie viele Funktionen existieren, die nicht im Zusammenhang mit der Fortbewegung stehen? Wie werden diese bedient?	1	3	4
7	Design	Ist die Funktionalität, der Preis, oder die Repräsentation für das Design wichtiger?	2	3	5
8	Connectivity	Wie gut ist das Fahrzeug mit anderen Fahrzeugen und privaten Endgeräten vernetzbar?	2	3	5
9	Komfort	Wie komfortabel ist die Nutzung des Fahrzeugs?	2	2	4
10	Leistungsgewicht	Wie ist das Verhältnis von Fahrzeuggewicht zu Antriebsleistung?	3	1	4

Bild 8: Auszug der abgeleiteten Funktionen und Produkteigenschaften

Die Verknüpfung der Produkteigenschaften mit den Indikatoren erfolgt anhand einer Vernetzungsanalyse mithilfe einer bidirektionalen Einflussmatrix. Es wird der Einfluss eines Indikators bzw. dessen Veränderung auf eine Produkteigenschaft – und vice versa – auf einer Skala von 0 (kein Einfluss) bis 3 (sehr großer Einfluss) bewertet. Die Bewertungen können auszugsweise Bild 9 entnommen werden.

		Produkteigenschaft																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Indikator	1	0	0	1	1	3	3	2	3	2	0	2	1	2	1	3	3	2	2	2	1
	2	0	0	0	1	3	3	1	3	2	1	1	1	2	1	3	3	2	2	1	2
	3	0	0	1	1	2	3	1	3	2	1	3	2	2	1	3	3	1	2	2	1
	4	0	0	0	0	1	3	1	3	1	1	2	1	1	1	3	3	1	3	1	2
	5	1	1	2	1	3	2	1	3	1	2	2	1	1	1	3	1	1	1	1	0
	6	0	0	1	1	2	1	0	2	2	2	1	0	2	0	2	1	1	0	0	0
	7	2	2	3	2	3	2	2	3	1	2	3	1	2	1	2	2	1	0	1	1
	8	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	3	1	2	1	1	2	1	1	2	3
	9	1	1	1	1	2	1	3	2	2	2	3	1	3	2	3	1	1	2	1	2
	10	2	2	2	2	3	1	2	0	1	1	2	0	1	1	3	2	1	2	1	1
	11	0	0	3	1	2	3	3	1	3	1	3	1	2	2	3	3	1	3	2	1
	12	3	2	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2
	13	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1
	14	0	0	2	1	2	3	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	2	2	1
	15	0	0	2	1	2	3	3	2	2	2	1	0	2	2	3	2	2	2	1	1
	16	0	0	0	0	1	3	0	3	0	0	2	1	1	1	3	2	1	2	1	2
	17	0	0	0	0	2	3	0	3	2	0	1	0	1	0	3	2	2	1	1	1
	18	2	2	1	2	2	3	1	3	1	1	3	0	2	1	3	3	1	1	0	2
	19	0	0	0	0	2	3	0	3	1	0	2	1	1	1	3	2	1	1	1	2
	20	0	0	0	0	2	3	1	3	1	1	3	0	1	1	3	3	1	1	1	2

Bild 9: Verknüpfung zwischen Indikatoren und Produkteigenschaften

6.2.2 Umfeld-Analyse

Die Umfeldanalyse in den Sub-Aktivitäten 2b und 3b erfolgt in ähnlicher Weise wie die Vorausschauanalyse mit dem Unterschied, dass in dieser mittels Scanning zunächst Nachrichten gesucht werden und relevante Informationen identifiziert werden müssen. Daher wird diese innerhalb der Monitoringaktivität kontinuierlich wiederholt durchgeführt, um neue Indizien aus aktuellen Nachrichten zu integrieren.

Der initiale Durchlauf der Umfeldanalyse wurde gestützt durch ChatGPT durchgeführt. Hierbei wurde der Prompt „Gibt es aktuelle Meldungen, aus denen sich Informationen zu den oben genannten Themen ableiten lassen?“ verwendet, um beispielhafte Nachrichten zu erhalten. Bei einem kontinuierlichen Durchlauf in realem Umfeld wäre hier eine Beobachtung des Nachrichtengeschehens einzusetzen. Aus den erhaltenen Nachrichten wurden gerichtete, teilweise messbare Kernaussagen manuell extrahiert. Aus der Nachricht „Sensorintegration: HERE-Technologies hat auf der CES 2025 KI-gestützte Kartenerstellung und Innovationen für SDVs vorgestellt, die eine nahtlose Integration von Sensoren und eine verbesserte Nutzererfahrung ermög-

lichen. ‘wurde das Indiz „*Integration von Sensoren für Kartendarstellung für verbesserte Nutzererfahrung*“. Bei der Aufbereitung von Nachrichten wäre statt der manuellen Betrachtung eine KI-Unterstützung sinnvoll. In der exemplarischen Betrachtung wurden 13 Nachrichten aufbereitet, um die grundsätzliche Anwendbarkeit zu untersuchen. Bei der Anwendung im realen Umfeld sollte eine Vielzahl an Nachrichten gesammelt und aufbereitet werden, was manuell nicht mehr handhabbar ist, weshalb eine entsprechende Unterstützung unter Einbeziehung von KI notwendig wäre.

6.3 Fazit und Diskussion

Die durchgeführte Anwendungsstudie zeigt, dass der entwickelte Ansatz grundsätzlich geeignet ist, um Ergebnisse aus der strategischen Vorausschau mit Planungen der Produktentwicklung systematisch zu verknüpfen und einen kontinuierlichen Abgleich zu ermöglichen. Die Studie wurde mit einem begrenzten Datensatz durchgeführt, was eine umfassende Validierung einschränkt. Ziel war jedoch bewusst die explorative Betrachtung einer beispielhaften Anwendung. Zudem wurden keine konkreten Experten aus der Produktentwicklung einbezogen. Dennoch konnten aus der Anwendungsstudie mehrere Verbesserungspotenziale identifiziert werden.

Der Einsatz von KI, insbesondere zur Unterstützung bei der Datenrecherche, hat sich als hilfreich erwiesen. Relevante Daten konnten schnell identifiziert und für die exemplarische Bewertung herangezogen werden. Allerdings ist die inhaltliche Qualität dieser Informationen kritisch zu betrachten. Für eine reale Anwendung in Unternehmen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass relevante und verlässliche Daten aus bestehenden Systemen zur Verfügung stehen und entsprechend integriert werden können. Die Bewertung der Indikatoren und Signale erfolgte in der Studie manuell. Vor dem Hintergrund wachsender Datenmengen – bei mehr als den exemplarisch betrachteten 20 bis 30 Datensätzen pro Bewertungsschritt – ist es notwendig, den möglichen Einsatz von KI zur Automatisierung und Skalierung der Bewertungsprozesse weiter zu untersuchen. Andernfalls kann die Bewertung schnell unübersichtlich und ineffizient werden.

Ein zentrales Optimierungspotenzial liegt in der Verknüpfung der aus der Vorausschau resultierenden Indikatoren mit konkreten Szenarien, Schlüsselfaktoren, Trends und Prognosen. Besonders beim erstmaligen Durchlauf liefert die separate Auswertung von Nachrichten zur Identifikation von Indizien wenig Mehrwert, solange keine Daten für Trends und Prognosen aus Vorarbeiten vorliegen. In diesem Fall wird dieser Schritt erst durch wiederholtes Scanning im Rahmen eines kontinuierlichen Monitorings relevant. Zur besseren Nachvollziehbarkeit und Transparenz sollte daher eine klare Verknüpfung der definierten Indikatoren mit den vorausschaubezogenen Ergebnissen hergestellt werden. Hierdurch können auch die weiteren strategischen Planungen im Unternehmen verknüpft werden, die eine Änderung der Prämissen ebenso betrifft wie die Produkteigenschaften.

Die Bewertung der Indikatoren in Form eines Portfolios ist erst bei einer ausreichenden Anzahl von Faktoren sinnvoll – etwa ab 25 – da sonst keine sinnvolle Priorisierung vorgenommen werden kann. Darüber hinaus sollten die genutzten Bewertungsmetriken sowie deren Beschreibungen gemeinsam mit Experten evaluiert und gegebenenfalls angepasst werden. Unter Umständen

kann auch eine spezifische Initialisierung der Metriken je nach Projekt- oder Unternehmenskontext notwendig sein. Für eine Vergleichbarkeit und einfache Anwendung sollte jedoch innerhalb der Durchführung ein einheitliches Bewertungsschema verwendet werden.

Für die Festlegung von Schwellenwerten ist die Einbindung von Experten aus der Produktplanung und dem Änderungsmanagement essenziell, um eine fundierte Einschätzung vornehmen zu können. Überdies ist die generelle Teamzusammensetzung zu definieren. Dabei sollte ein übergreifendes Kernteam gebildet werden, das unabhängig von den resultierenden Entscheidungen agieren kann. Für die konkrete Bewertung einzelner Indikatoren sind jedoch Experten aus den jeweiligen Unternehmensbereichen einzubeziehen.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Festlegung konkreter, quantitativer Schwellenwerte erst dann sinnvoll ist, wenn ein ausreichender Reifegrad in der Planung erreicht wurde. Qualitative Beschreibungen allein erlauben keine belastbare Ableitung entsprechender Werte. Hier wären qualitative Leitplanken zu definieren, die sich etwa an der übergeordneten Unternehmens- oder Produktstrategie orientieren und in den Abteilungen konkret heruntergebrochen werden können.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein entwickelter Ansatz zum kontinuierlichen Monitoring exemplarisch anhand von Daten aus dem Forschungsprojekt Software-Defined Car (SofDCar) angewendet. Ziel war es, die praktische Anwendbarkeit des Ansatzes zu evaluieren und Potenziale zur methodischen Weiterentwicklung zu identifizieren. Hierzu wurden relevante Zukunftsszenarien sowie zugrunde liegende Schlüsselfaktoren, Trends, Prognosen und Nachrichten analysiert und in den Monitoring-Ansatz integriert. Die Anwendbarkeit konnte grundsätzlich bestätigt werden. Gleichzeitig ergaben sich aus der exemplarischen Umsetzung mehrere konkrete Ansätze zur Weiterentwicklung und Optimierung. Dazu zählt vor allem die gezielte Einbindung von KI-basierten Tools zur effizienten Identifikation und Bewertung relevanter Informationen. Diese ist insbesondere im Hinblick auf die Skalierbarkeit bei größeren Datensätzen von Bedeutung. Zudem wurde deutlich, dass eine stärkere und systematischere Verknüpfung der abgeleiteten Indikatoren und Indizien mit den jeweiligen Elementen der Vorausschau (z. B. Szenarien, Trends oder Prognosen) die Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Analyse signifikant verbessern kann. Für eine weiterführende Anwendung im Unternehmenskontext sollte darüber hinaus untersucht werden, welche Experten in welcher Aktivität des Ansatzes sinnvollerweise in den Prozess eingebunden werden sollten. Eine differenzierte Rollenverteilung kann dazu beitragen, die Bewertung von Entwicklungen gezielter, fundierter und entscheidungsorientierter vorzunehmen. Künftige Arbeiten sollten diesen Aspekt vertiefen und den Ansatz im realen industriellen Umfeld weiter validieren.

Förderhinweis

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 19S21002 gefördert.

Literatur

[Sof21] SofDCar Projektantrag, 2021

[ADK+23] ALBERS, A.; DÜSER, T.; KUEBLER, M.; SCHWARZ, S. E.; LICKEFETT, M. S.; PFAFF, F.; THÜMMEL, C.: Upgradeable Mechatronic Systems – Definition and Model of Upgrades in the Context of the Model of SGE - System Generation Engineering: Fisita World Congress 2023, 2023

[ADM+18] ALBERS, A.; DUMITRESCU, R.; MARTHALER, F.; ALBERS, A. A.; KUHFÜSS, D.; STRAUCH, M.; SIEBE, A.; BURSAC, N.: PGE-Produktgenerationsentwicklung und Zukunftsvorausschau – Eine systematische Betrachtung zur Ermittlung der Zusammenhänge: 14. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Berlin, 2018

[AG12] ALBERS, A.; GAUSEMEIER, J.: Von der fachdisziplinorientierten Produktentwicklung zur Vorausschauenden und Systemorientierten Produktentstehung: Smart Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, S. 17–29

[AHH+18] ALBERS, A.; HEITGER, N.; HAUG, F.; FAHL, J.; HIRSCHTER, T.; BURSAC, N.: SUPPORTING Potential Innovation in the Early Phase of PGE – Product Generation Engineering – Structuring the Development of the Initial System of Ob-jectives. “R&Designing Innovation: Transformational Challenges for Organizations and Society, 2018, S. 1–13

[AHW+18] ALBERS, A.; HEIMICKE, J.; WALTER, B.; BASEDOW, G. N.; REIß, N.; HEITGER, N.; OTT, S.; BURSAC, N.: Product Profiles: Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. Procedia CIRP, (70), 2018, S. 253–258

[AKR+22] ALBERS, A.; KÜRTEN, C.; RAPP, S.; BIRK, C.; HÜNEMEYER, S.; KEMPF, C.: SGE – Systemgenerationsentwicklung: Analyse und Zusammenhänge von Entwicklungspfaden in der Produktentstehung. Unter: https://www.researchgate.net/publication/364185334_SGE_-_Systemgenerationsentwicklung_Analyse_und_Zusammenhange_von_Entwicklungspfaden_in_der_Produktentstehung

[AMS+22] ALBERS, A.; MARTHALER, F.; SCHLEGEL, M.; THÜMMEL, C.; KÜBLER, M.; SIEBE, A.: Eine Systematik zur zukunftsorientierten Produktentwicklung – Gene-rationsübergreifende Ableitung von Produktprofilen zukünftiger Produktgene-rationen durch strategische Vorausschau. KIT Scientific Working Papers, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2022

[ARB+16] ALBERS, A.; REISS, N.; BURSAC, N.; RICHTER, T.: iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering. Procedia CIRP, (50), 2016, S. 100–105

[ATS+24] ALBERS, A.; THÜMMEL, C.; SCHMIDT, J.; SCHWARZ, S. E.; SCHLEGEL, M.; SIEBE, A.; DÜSER, T.: Understanding and definition of scanning and monitoring of the future space in the context of the product engineering process. In: Design Society (Hrsg.): INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE – DE-SIGN 2024. 18th International Design Conference, 20.-23. Mai 2024, Dubrovnik, Croatia, 2024

[BC09] BLESSING, L. T. M.; CHAKRABARTI, A.: DRM, a design research methodology. Springer, Dordrecht, 2009

[FS11] FINK, A.; SIEBE, A.: Handbuch Zukunftsmanagement – Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung. 2. Auflage, Management, Campus-Verl., Frankfurt am Main, 2011

[FS16] FINK, A.; SIEBE, A.: Szenario-Management – Von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrobusten Entscheidungen. Campus Verlag, Frankfurt, 2016

[Gau19] GAUSEMEIER, J.: Voraussetzungen für die Integration von Strategischer Vorausschau in der Entwicklung // Vorausschau und Technologieplanung – 15. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung. HNI-Verlagsschriftenreihe Band 390, Universität Paderborn Heinz Nixdorf Institut, Paderborn, 2019

[GFS98] GAUSEMEIER, J.; FINK, A.; SCHLAKE, O.: Scenario Management – An Approach to Develop Future Potentials. Technological Forecasting and Social Change, (59 (2)), 1998, S. 111–130

[GKS+03] GRUBER, M.; KOLPATZIK, B. W.; SCHÖNHUT, J.; VENTER, C.: Die Rolle des Corporate Foresight im Innovationsprozess: Ziele, Ausgestaltung und Erfahrungen am Beispiel der Siemens AG. *Zeitschrift Führung + Organisation*, (72) ARTICLE, 2003

[GV06] GRUBER, M.; VENTER, C.: „Die Kunst, die Zukunft zu erfinden“ — Theoretische Erkenntnisse und empirische Befunde zum Einsatz des Corporate Foresight in deutschen Großunternehmen. *Schmalenbachs Zeitschrift für betriebs-wirtschaftliche Forschung*, (58)7, 2006, S. 958–984

[KSS+23] KUEBLER, M.; SCHUSTER, W.; SCHWARZ, S. E.; BRAUMANDL, A.; SIEBE, A.; ALBERS, A.: Upgradeable Mechatronic Systems - An Approach to determine changing Product Properties using Foresight. *Procedia CIRP*, (119), 2023, S. 78–83

[KTS+23] KUEBLER, M.; THÜMMEL, C.; SPEKKER, M.; SIEBE, A.; ALBERS, A.: Weiterentwicklung und Evaluation einer Systematik zur Bestimmung sich ändernder Produkteigenschaften. In: Dumitrescu, R.; Hölzle, K. (Hrsg.): *Vorausschau und Technologieplanung. 17. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, 14.-15.09.2023, Berlin*, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 413, Paderborn, 2023

[Mey14] MEYER-SCHWICKERATH, B.: *Vorausschau im Produktentstehungsprozess – Das integrierte Produktentstehungs-Modell (iPeM) als Bezugsrahmen für Vorausschau am Beispiel von Szenario-technik und strategischer Frühaufklärung*. Forschungsberichte, IPEK, Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie, 2014

[Mül08] MÜLLER, A. W.: *Strategic Foresight – Prozesse strategischer Trend- und Zukunftsforschung in Unternehmen*. Dissertation, Universität St. Gallen, Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften, 2008

[PB99] PATNAIK, D.; BECKER, R.: Needfinding: The Why and How of Uncovering People's Needs. *Design Management Journal (Former Series)*, (10)2, 1999, S. 37–43

[Rop75] ROPOHL, G. (Hrsg.): *Systemtechnik – Grundlagen und Anwendung*. Hanser, München, 1975

[Sch39] SCHUMPETER, J. A.: *Business cycles – A theoretical, historical, and statistical analysis of the capitalist process*. McGraw-Hill, New York, NY, 1939

[Sie07] SIEG, O. C.: Ein Beitrag zur integrativen Unterstützung des Produktentwicklungscontrollings. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2007

[Sie18] SIEBE, A. (Hrsg.): *Die Zukunft vorausdenken und gestalten – Stärkung der Strategiekompetenz im Spartencluster it's OWL*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018

[TES+25] THÜMMEL, C.; EBI, S.; SCHLEGEL, M.; SIEBE, A.; DÜSER, T.; ALBERS, A.: AN Approach for Continuous Monitoring of Product properties Between Strategic Foresight and the Product Engineering Process. In: Gericke, K.; Summers, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 25th International Conference on Engineering Design (ICED25). 25th International Conference on Engineering Design (ICED25)*, Dallas, Texas, 2025

[TFS+24] THÜMMEL, C.; FEHRENBACHER, R.; SCHWARZ, S. E.; KUEBLER, M.; BAUSE, K.; ALBERS, A.: Methods for Product Planning and Validation for a Modularized Software-Defined Car Concept. In: IEOM Society International (Hrsg.): *Proceedings of the 7th European Conference on Industrial Engineering and Operations Management. 7th European Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, July 16-18, 2024, Augsburg, Germany, 2024

[THS+24] Thümmel, C.; Heller, T.; Siebe, A.; Albers, A.: An Approach for continuous Integration of Foresight Information into the Product Engineering Process. In: Design Society (Hrsg.): *Norddesign Conference*. 12.-14. August 2024, Reykjavik, Iceland, 2024

[TKS+23] THÜMMEL, C.; KLEINSCHROT, M.; SCHWARZ, S. E.; SIEBE, A.; ALBERS, A.: Analysis of the Integration of Monitoring Approaches Using Strategic Foresight in the Product Engineering Process. In: IEOM Society International (Hrsg.): *2nd Australian Conference on Industrial Engineering and Operations Management. 22nd Australian Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, November 14-16, 2023, Melbourne, Australia, 2023

[TKS+24] THÜMMEL, C.; KISS, D.; SCHWARZ, S.; SIEBE, A.; ALBERS, A.: Verortung von Produktprofilen im zukünftigen Umfeld durch Abgleich von Szenarien. In: Paetzold, K.; Augsten, A.; Krzywinski, J. (Hrsg.): EEE 2024 - Entwerfen, Entwickeln, Erleben – Menschen, Technik und Methoden in Produktentwicklung und Design. 27.-28. Juni 2024, Dresden, 2024

[TSK+22] THÜMMEL, C.; SCHLEGEL, M.; KÜBLER, M.; SCHWARZ, S.; SIEBE, A.; ALBERS, A.: Foresight in Product Development - A Review on Existing Understandings and Approaches: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. The 1st Australian Conference on Industrial Engineering and Operations Management in Sydney, 20.12.2022 - 22.12.2022, Sydney, Australia, IEOM Society International, Michigan, USA, 2022, S. 261–271

[TSR+23] THÜMMEL, C.; SCHWARZ, S. E.; RITZER, K.; KUEBLER, M.; SIEBE, A.; ALBERS, A.: Identification of Fields of Action for the Integration and Validation of Future-Oriented Customer-Relevant Product Characteristics During the Product Engineering Process. In: IEOM Society International (Hrsg.): 6th European Conference on Industrial Engineering and Operations Management. 6th European Conference on Industrial Engineering and Operations Management, July 18-20, 2023, Lisbon, Portugal, 2023

[TSS+25] THÜMMEL, C.; SCHMIDT, T. A.; SIEBE, A.; ALBERS, A.: A Systematic Approach for Continuous Monitoring and Validation of Product Properties in the Product Engineering Process. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 31st ICE IEEE/ITMC Conference on Engineering, Technology, and Innovation ICE 2025. International Conference on Engineering, Technology, and Innovation 2025, 16th-19th June 2025, Valencia, Spain, IEEE, 2025

[TUE+24] THÜMMEL, C.; URBINA PUCH, C. R.; EBI, S.; SCHWARZ, S. E.; SCHMITZ, M.; SIEBE, A.; ALBERS, A.: Beschreibungsmodell für die kontinuierliche Integration von strategischer Vorausschau in den Produktentstehungsprozess. In: Dumitrescu, R.; Hölzle, K. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 18. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, 05.-06.12.2024, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Paderborn, 2024, S. 125–142

[Wei25] WEISSENBERGER-EIBL, M.A. (Hrsg.): Zukunftsgestalter Deutschlands – Pioniergeschichten aus Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Zivilgesellschaft. Springer Gabler Berlin, Heidelberg, 2025

[Wes06] WESTKÄMPER, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, 2006

Autoren

Carsten Thümmel schloss 2018 seinen Bachelor in Maschinenbau ab und erhielt 2021 seinen Master am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Er ist Doktorand und Gruppenleiter in der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik und -management am IPEK - Institut für Product Engineering des KIT. Seine Forschungsinteressen umfassen Vorausschau, Produktplanung und Monitoring für das Innovationsmanagement und die Produktentwicklung in Kombination mit strategischer Vorausschau.

Maximilian Kuebler hat einen Masterabschluss im Fach Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erlangt. Seit 2021 arbeitet er als Referent der Institutsleitung beim IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT. Parallel forscht er als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand in der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik und -management. Sein Forschungsschwerpunkt liegt im Innovationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und strategischer Vorausschau. Dabei adressiert er die generationsübergreifende Planung von Produkten sowie ihrer Teilsysteme mit einem Fokus auf Upgrades.

Prof. Dr.-Ing. Andreas Siebe ist Honorarprofessor am IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT und lehrt "Strategische Potenzialfindung zur Entwicklung innovativer Produkte". Er studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Paderborn und promovierte am Heinz Nixdorf Institut in Paderborn im Fachbereich Maschinenbau. Danach war er Mitbegründer und bis 2019 Mitglied des Vorstandes eines Beratungsunternehmens, das sich mit der Entwicklung von Szenarien beschäftigt. Er gilt als Experte und ist Autor für Zukunfts- und Szenariomanagement mit besonderem Fokus auf das Innovationsmanagement. Seine Forschungsinteresse liegt in der Kombination von Zukunftsmethoden mit Methoden der Produktentwicklung, insbesondere in den frühen Phasen. Sein Schwerpunkt dabei ist die Implementierung zukünftiger Kundenbedürfnisse in den Produktentwicklungsprozess.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Düser ist seit Oktober 2022 Institutsleiter am IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Nach seinem Studium am Karlsruhe Institut für Technologie und anschließender Promotion am IPEK - Institut für Produktentwicklung hatte Tobias Düser innerhalb der AVL Gruppe verschiedene Positionen im Bereich innovativer Entwicklungs- und Validierungsmethoden inne. Dabei arbeitete er insbesondere an neuartigen Automatisierungs- und Simulationslösungen für Prüfstände. U. a. war er beteiligt am Aufbau eines neuen Geschäftsbereiches, des Produktpportfolios und Partnernetzwerkes im Bereich Advanced Driver Assistant Systemen sowie für das Automatisierte Fahren. Er war Mitglied des globalen Führungskreises ADAS/AD und auch intensiv an der globalen Strategieentwicklung beteiligt. Ab 2015 war er verantwortlich für das Advanced Solution Lab bei AVL und Leiter des Standortes Karlsruhe. 2020 übernahm er zusätzlich die globale Verantwortung für den Bereich ADAS/AD Virtual Testing Solutions. Tobias Düser und sein Team arbeiteten an virtuellen und XIL-basierten Validierungsmethoden für das Absichern und Testen von Advanced Driver Assistant Systemen sowie für das Automatisierte Fahren. Darüber hinaus wirkt er in verschiedenen Arbeitsgruppen wie z. B. der IAMTS oder der UNECE mit.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers leitet das IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen: (1) Strategien, Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses, (2) Fahrzeug- und Maschinenantriebssysteme und deren Komponenten mit Schwerpunkt Dimensionierung, Dynamik, NVH, Akustik und Komfort sowie Energieeffizienz, (3) Mechatronische Systeme sowie (4) neue hochschuldidaktische Ausbildungskonzepte zur Vermittlung von Fachkompetenz und Professional Skills.

Intelligentes Web Crawling für die industrielle Trendanalyse: Eine skalierbare KI-gestützte Architektur

**Richard Zowalla¹, Jan Mackensen¹, Meng Jin¹, Kristian Schaefer¹,
Safa Omri¹, Jens Neuhüttler¹**

¹ Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, richard.zowalla@iao.fraunhofer.de,
jan.mackensen@iao.fraunhofer.de, meng.jin@iao.fraunhofer.de, kristian.schaefer@iao.fraunhofer.de,
safa.omri@iao.fraunhofer.de, jens.neuhuettler@iao.fraunhofer.de

Zusammenfassung

Die rechtzeitige Erkennung neuer Trends ist für strategische Vorausschau und industrielle Forschung von entscheidender Bedeutung. Herkömmliche Web-Crawler sind zwar bei der Erfassung großer Datenmengen effektiv, verfügen jedoch häufig nicht über semantische Filter-funktionen, was zur Anhäufung von irrelevanten oder wenig wertvollen Informationen führt. Um diese Limitation zu beheben, wird in diesem Artikel eine fokussierte Web-Crawling-Architektur vorgestellt, die Large Language Models (LLMs) für die dynamische Bewertung und Priorisierung von Inhalten integriert. Das System basiert auf einem verteilten Framework unter Verwendung von Apache StormCrawler, Apache Storm, Playwright und OpenSearch. LLMs sind in den Crawling-Prozess integriert, um bei Bedarf Relevanzbewertungen durchzuführen und den Crawler zu Inhalten mit hoher thematischer Relevanz zu leiten. Dieser Ansatz reduziert Datenrauschen und erhöht die Effizienz der webbasierten Informationssammlung bei gleichzeitiger Verringerung der Rechenkomplexität und der Kosten. Über die technische Infrastruktur hinaus beschreibt der Artikel die analytischen Methoden, die auf die gesammelten Inhalte angewendet werden, darunter Topic Modelling zur Trenderkennung und Clustering-Algorithmen zur thematischen Strukturierung. Das Ergebnis ist eine modulare, skalierbare Pipeline, die unstrukturierte Webdaten in strukturierte Erkenntnisse umwandeln kann und damit fortschrittliche Anwendungen in der strategischen Frühwarnung für aufkommende Trends und für die Technologieplanung unterstützt. Durch die Integration von LLMs in das fokussierte Web-Crawling leistet diese Arbeit einen methodischen Beitrag in den Bereichen Vorausschau, Innovationsmanagement und datengesteuerte strategische Analyse. Alle Komponenten und Techniken werden vor dem Hintergrund des aktuellen Stands der Technik kontextualisiert, um ihren Mehrwert und ihren neuartigen Beitrag zum Fachgebiet hervorzuheben.

Schlüsselworte

Web-Crawler, Large Language Models, Topic Modelling, Foresight, Trend Analysis

Intelligent Web Crawling for Industrial Trend Analysis: A Scalable AI-Driven Architecture

Abstract

Timely identification of emerging trends is essential for strategic foresight and industrial research. Conventional web crawlers, though effective at large-scale data collection, often lack semantic filtering capabilities, leading to the accumulation of contextually irrelevant or low-value information. To address this limitation, this paper presents a focused web crawling architecture that integrates Large Language Models (LLMs) for dynamic content evaluation and prioritization. The system is built on a distributed framework using Apache StormCrawler, Apache Storm, Playwright, and OpenSearch. LLMs are integrated into the crawling process to perform on-demand relevance estimation, guiding the crawler toward content with high thematic relevance. This approach reduces data noise and increases the efficiency of web-based information gathering, while reducing computational complexity and cost. Beyond infrastructure, the paper details the analytical methods applied to the collected content, including topic modeling for trend detection and clustering algorithms for thematic structuring. The result is a modular, scalable pipeline capable of transforming unstructured web data into structured insights, supporting advanced applications in strategic early warning for emerging trends and technology planning. By integrating LLMs into focused web crawling, this work contributes methodological improvements to the fields of foresight, innovation management and data-driven strategic analysis. All components and techniques are contextualized against the current state of the art to highlight their added value and novel contribution to the field.

Keywords

Web Crawler, Large Language Models, Topic Modelling, Foresight, Trend Analysis

1 Einleitung

Die strategische Vorausschau und frühzeitige Identifikation technologischer Trends bilden heute einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil für Unternehmen und Forschungseinrichtungen [RK 2018, HG 2015]. In einer zunehmend digitalisierten Wirtschaft mit verkürzten Technologiezyklen stehen Organisationen vor der Herausforderung, aus der exponentiell wachsenden Informationsflut des Internets relevante Erkenntnisse zu extrahieren [PFN 2023, DSL+ 2025, MSA+ 2025].

Vor diesem Hintergrund gewinnen datengetriebene Methoden zur Trendanalyse und strategischen Früherkennung zunehmend an Bedeutung [Roh14], da klassische Verfahren wie Expertenbefragungen, Patentanalysen oder Marktstudienangesichts der Datenmenge und Dynamik an ihre Grenzen stoßen. Die automatisierte Erfassung und Analyse offener Webdaten versprechen daher einen erheblichen Mehrwert – vorausgesetzt, es gelingt, die Relevanz der Inhalte effizient zu bewerten und inhaltlich präzise einzuordnen. Herkömmliche Web-Crawler sind jedoch primär auf die breite Sammlung von Informationen ausgelegt und verfügen oft nicht über hinreichende semantische Filtermechanismen. In der Folge kommt es zu einer hohen Rate irrelevanter oder nur marginal nützlicher Inhalte, was die nachgelagerte Analyse erschwert und unnötige Rechenressourcen bindet.

Zur Überwindung dieser Einschränkung wird in der vorliegenden Arbeit ein neuartiger Ansatz vorgestellt, der fokussiertes Web-Crawling mit Generativer Künstlicher Intelligenz (GenAI) – insbesondere Large Language Models (LLMs) – kombiniert. Ziel ist es, thematisch hochrelevante Inhalte automatisiert zu identifizieren, zu priorisieren und in strukturierter Form zur Verfügung zu stellen. Die entwickelte Architektur basiert auf einem verteilten Framework mit Apache StormCrawler und Playwright. Das System integriert LLMs zur dynamischen Relevanzbewertung während des Crawling-Prozesses. Damit werden Inhalte mit hoher thematischer Dichte gezielt angesteuert, Datenrauschen (irrelevante Informationen) reduziert und der Wirkungsgrad der webbasierten Informationsgewinnung erheblich gesteigert.

Durch die Kombination von fokussiertem Web-Crawling mit modernen Topic-Modelling-Techniken wie BERTopic [Gro22] sowie der LLM-gestützten semantischen Analyse entsteht eine skalierbare, modular aufgebaute Pipeline, die unstrukturierte Webdaten in verwertbare Erkenntnisse überführt. Neben der technischen Architektur werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch methodische Aspekte wie Klassifikation, Themenextraktion, Evaluation sowie die Visualisierung relevanter Trends detailliert behandelt. Auf diese Weise leistet die Arbeit einen Beitrag zur Weiterentwicklung datenbasierter Strategiewerkzeuge im Bereich der industriellen Vorausschau und trägt zur methodischen Integration generativer KI in reale Informationssysteme bei.

1.1 Stand der Forschung

1.1.1 Fokussiertes Web-Crawling

Das indexierte Web, d.h. der Teil des Internets, der durch öffentliche Suchmaschinen indexiert ist, wurde 2015 von van der Bosch et al. auf circa 47 Milliarden Webseiten geschätzt [vBK16] und hat sich seitdem weiter vergrößert. Angesicht dieser Datenmenge ist es notwendig, fokussiertes Web-Crawling einzusetzen, um themenspezifische Informationen effizient erfassen zu können. Hierfür nutzt ein fokussierter Web-Crawler die Themenlokalität des Webs aus [Dav00, Men04, Men05], indem die thematische Nähe von Webseiten durch Priorisierung der zu erfassenden Webseiten maximal ausgenutzt wird [KBR17].

Fokussierte Web-Crawler werden für unterschiedlichste Zwecke eingesetzt. Rheinländer et al. setzten fokussiertes Web-Crawling unter Verwendung eines Naive Bayes Klassifikators für die gezielte Sammlung von englischsprachigen biomedizinischen Webinhalten ein und erreichten eine Harvest Rate (HR; Anteil themenrelevanter Seiten an allen gecrawlten Webseiten) von 38% [RLK+16]. Zowalla et al. hingegen verwendeten einen Support Vector Machine (SVM) Ansatz zur Sammlung von deutschsprachigen Gesundheitswebseiten und erreichten eine HR von 21,27% [ZWP20]. In 2023 untersuchten Sakai et al. ein System zur automatischen Erkennung von japanischen „Fake Shops“ unter Verwendung klassischer Verfahren aus dem Bereich des Maschinellen Lernens und erreichten eine HR von mehr als 20% [STK+23]. [RN23] verwendeten Support Vector Regression (SVR) für ihren fokussierten Web-Crawler und erreichten eine HR von 37%.

Bisher kommen dabei vornehmlich klassische Verfahren des maschinellen Lernens zum Einsatz. Der Einsatz von GenAI nimmt jedoch langsam zu – insbesondere im Bereich der Textextraktion und des Parsings werden LLMs häufig eingesetzt [BRR+24, AW24, Hua25]. Für die Relevanzschätzung von Webseiten finden LLMs hingegen bislang kaum Anwendung, vermutlich aufgrund noch unzureichender Performance bei der thematischen Präzisierung und Effizienz im Vergleich zu etablierten, leichter gewichtigen Verfahren. Herkömmliche Suchmaschinen wie Google bieten zudem keine vollständige Abdeckung themenspezifischer Inhalte und schränken den automatisierten Zugriff technisch sowie lizenzerrechtlich ein. Zudem fehlt Transparenz über Indexierungs- und Rankingmechanismen, was eine gezielte Relevanzbewertung erschwert. Daher ist es notwendig, fokussiertes Web-Crawling selbst umzusetzen, um eine gezielte, steuerbare und umfassende Sammlung von relevanten Web-Inhalten zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird in dieser Studie ein entsprechender Ansatz vorgestellt, um LLMs gezielt für die Relevanzbewertung beim fokussierten Web-Crawling einzusetzen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass fokussiertes Web-Crawling zwar erfolgreich eingesetzt wird, aber bisher vor allem auf klassischen Verfahren aus dem Bereich des Maschinellen Lernens basiert. Moderne KI-Methoden wie LLMs wurden hier noch kaum integriert.

1.1.2 KI-gestützte Trendanalysen

Trendscouting umfasst alle Aktivitäten, die sich mit dem Sammeln und Auswerten von Informationen beschäftigen, um frühzeitig Veränderungen in Technologien und Themengebieten zu erkennen [Roh14]. Als Teil des Corporate Foresight werden die gewonnenen Informationen genutzt, um eine zukunftsorientierte Unternehmensstrategie zu entwickeln [Roh14]. KI spielt eine große Rolle beim Trendscouting, da durch den Einsatz von KI-Methoden Informationen effizienter dargestellt werden können sowie die Sammlung und Analyse großer Datenmengen automatisiert werden kann. Dies übertrifft die Möglichkeiten der etablierten, klassischen Trendscouting-Methoden, wie beispielsweise der Expertenbefragung [FNB24].

Eine Anwendung von KI im Trendscouting ist die Vorhersage zukünftiger Marktentwicklungen anhand von Zeitreihendaten. Lesmana et al. zeigen, dass sich Zeitreihendaten von Nachrichtenagenturen mit KI-Modellen besser vorhersagen lassen als mit traditionellen Ansätzen [LWN+24]. Im Trendscouting werden in der Regel jedoch Analysen von Textinhalten durchgeführt. Schuh et al. demonstrieren, wie KI dazu eingesetzt werden kann, technologische Begriffe in Texten zu identifizieren und einem Technologieradar zuzuordnen. [SHS+21]. Die verbreitetste KI-Methode zur Textanalyse für Trendscouting ist das Topic Modeling zur Identifikation von Themen.

Eine der meistgenutzten Topic-Modelling-Techniken ist die Latent Dirichlet Allocation (LDA) [BNJ03]. LDA wird beispielsweise zur Analyse von Trends in Twitter-Daten [RFB+21] oder zur Ermittlung von Trends in politischen Debatten und Magazinen eingesetzt [DSL+23]. Eine neuere Methode des Topic-Modellings ist BERTopic, bei der Embedding-Technologien zusammen mit Clustering-Verfahren eingesetzt werden, um Dokumente in passende Themengebiete zu clustern [Gro22]. Jin et al. nutzen BERTopic, um in F&E-Förderungsdatenbanken Trends in der Förderung emissionsfreien Bauens zu entdecken [JB23].

Auch Large Language Models (LLMs) finden im KI-gestützten Trendscouting Anwendung. Besonders relevant ist die Retrieval-Augmented Generation (RAG), bei der LLMs mit Textdatenbanken verknüpft werden, um themenspezifische Analysen und Zusammenfassungen zu erstellen [HSM24]. In Kombination mit Topic Modeling lassen sich so tiefere Einblicke in einzelne Themenbereiche gewinnen [KW:24].

Insgesamt dient KI im Trendscouting vor allem der Analyse von Textdaten. Die Datenerhebung erfolgt hingegen meist ohne KI – entweder selektiv [LWN+24] oder durch Schlüsselwortsuche bei großen Datenmengen [DSL+23, JB23, KW:24].

1.2 Ziele und Forschungsfragen

In dieser Studie liegt der Fokus auf der Entwicklung eines KI-gestützten, fokussierten Web-Crawlers zur themenspezifischen Erfassung und Analyse von Webinhalten. Ziel ist es, das Potenzial von LLMs für die Relevanzbewertung im Crawling-Prozess zu demonstrieren und so die Effizienz bei der Datenerhebung im Kontext von Trend- und Technologiescouting zu erhöhen. Konkret verfolgt die Arbeit vier Ziele:

- 1) Demonstration der Einsatzmöglichkeiten von LLMs zur dynamischen Relevanzbewertung und thematischen Steuerung eines fokussierten Web-Crawlers.
- 2) Entwicklung einer flexiblen, konfigurierbaren Crawler-Architektur für kundenspezifische Anwendungsfälle
- 3) Kombination von Topic-Modelling und RAG-Ansätze zur Analyse und Strukturierung gesammelter Inhalte
- 4) Darstellung eines prototypischen Systems zur kontinuierlichen, themenspezifischen Beobachtung des Webs für die technologische Vorausschau

Darüber hinaus liefert die Arbeit Erkenntnisse zur Integration heterogener Datenquellen und gibt Einblicke in die technischen und konzeptionellen Herausforderungen beim Aufbau einer skalierbaren Analysepipeline. Soweit den Autoren bekannt, existieren bislang keine vergleichbaren Ansätze, die LLMs in fokussierte Web-Crawler zur Trendidentifikation integrieren.

2 Methodik

2.1 Systemüberblick

Das entwickelte Software-System folgt einer Pipeline-Architektur und besteht aus verschiedenen Komponenten, um den Trendscouting Prozess abzubilden. Der Pipeline-Prozess lässt sich in drei Phasen gliedern und besteht aus den nachfolgenden Elementen:

- 1) Datenerfassung: In diesem Schritt werden relevante Daten (z.B. Webseiten, Literaturdatenbanken) mittels des fokussierten Web-Crawlers SPIDERWISE erfasst.
- 2) Themenidentifikation: Anschließend werden die Daten mithilfe von Methoden wie Topic Modelling analysiert, um spezifische Themen und Trends zu erkennen.
- 3) Präsentation: Die ermittelten Themen und Trends werden dem Nutzenden über ein Dashboard dargestellt.

2.2 Fokussiertes Web-Crawling

2.2.1 Web-Crawling-Prozess

Ein Web-Crawler traversiert den gerichteten Graphen des Webs [BP12]. Ausgehend von einer Menge an Startadressen („seeds“), erfasst dieser die jeweiligen Webseiten. Wenn der Download erfolgreich ist, wird die Struktur der jeweiligen Webseite zerlegt und Referenzen auf weitere Webseiten (Hyperlinks bzw. Unified Ressource Locators (URLs)) extrahiert. Diese Hyperlinks werden dann analysiert und in eine prioritätssortierte Warteschlange, die sog. Frontier, eingefügt [BP12, DS11, CvD99]. Der Web-Graph wird dann Schritt für Schritt über die in der Frontier enthaltenen URLs besucht. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis die Frontier leer ist oder der Web-Crawl manuell gestoppt wird.

Auf Grund der Größe des Webs [vBK16] muss man sich auf einen bestimmten Themenbereich festlegen, um die Erfassung zu beschleunigen. In diesem Zusammenhang besucht ein fokussierter Web-Crawler nur diejenigen ausgehenden Links einer Webseite, die für das gegebene Thema relevant zu sein scheinen. Um festzustellen, ob ein Link relevant ist oder nicht, wird davon ausgegangen, dass Webseiten desselben Themas höchstwahrscheinlich mit anderen Webseiten desselben Themas verlinkt sind [Dav00, Men04]. Die Relevanz einer Webseite wird häufig über Textklassifikationsverfahren bestimmt [MMB14, RN23, STK+23]. Während dabei traditionell klassische Methoden des Maschinellen Lernens wie SVMs zum Einsatz kommen, zeigen wir erstmals, dass auch LLMs hierfür effektiv genutzt werden können. Eine Menge von Klassifikatoren und Heuristiken werden dann eingesetzt, um irrelevante Inhalte während des Web-Crawls herauszufiltern und den extrahierten URLs auf der Grundlage des Klassifikationsergebnisses eine Priorität zuzuweisen.

2.2.2 Systemarchitektur und Prozessablauf

Angesichts der Größe des Webs ist es naheliegend, dass die sequenzielle Verarbeitung einer solchen Datenmenge einen enormen Zeitaufwand und entsprechende finanzielle Ressourcen erfordern würde. Aus diesem Grund ist eine verteilte Systemarchitektur notwendig, um Ergebnisse verfügbar zu machen, bevor sich das Web merklich verändert hat. Dies ist insbesondere für die Erkennung von Trends und deren Überwachung von Bedeutung. Daher muss eine solche Architektur so konzipiert sein, dass sie Tausende von Threads zum parallelen Abrufen von Webseiten verarbeiten kann und dabei auch mit dynamischen Web-Inhalten umgehen kann. Neben der Effizienz in Bezug auf den Durchsatz sollte ein Crawler auch die Crawler-Ethik beachten [Liu11, Eic95], d.h. sich an das Robots-Exclusion-Protokoll zu halten und den Ziel-Webserver nicht mit zu vielen Anfragen in kurzer Zeit zu überlasten. Aus diesem Grund ist die Implementierung von künstlichen Verzögerungen zwischen Anfragen an denselben Webserver obligatorisch. Darüber hinaus muss ein Web-Crawler robust gegenüber Spidertraps, d.h. Webseiten mit Programmfehlern oder dynamisch generierten URLs, die zu einer Endlosschleife des Web-Crawlers führen [Liu11], sein. Zudem muss der HTML-Parser mit invalider Syntax oder ungültigem Markup sowie binären oder dynamischen Inhalten umgehen [Liu11]. Darüber hinaus müssen die Textextraktionskomponenten Boilerplate-Erkennung in geeigneter Weise handhaben.

Unser fokussierter Web-Crawler *SPIDERWISE* wurde auf Grundlage des Open-Source Frameworks Apache StormCrawler (SC) entwickelt. SC ist ein Software Development Kit für den Aufbau von skalierbaren Web-Crawlern auf Grundlage des Stream Processing Frameworks Apache Storm. SC verfügt jedoch nicht über fertige Komponenten für fokussiertes Web-Crawling, bietet jedoch die Möglichkeit, eigene Erweiterungen und Konfigurationsoptionen hinzuzufügen. Aus diesem Grund wurde SC für den beschriebenen Anwendungsfall erweitert. Bild 1 zeigt die Architektur unseres fokussierten Web-Crawlers.

SC stellt eine rekursive Web-Crawler-Architektur zur Verfügung. Ein *Seed-Injector* liest zunächst ungesehene URLs (Seeds) aus einer Textdatei ein und fügt diese der Frontier hinzu. Im nächsten Schritt werden bisher ungesehenen URLs durch eine definierte Menge von *Spouts* aus der *Frontier* ausgelesen. Um den Regeln der Web-Crawler Ethik gerecht zu werden, werden

diese URLs basierend auf ihrem aufgelösten Hostnamen dedizierten Cluster-Knoten zugewiesen und an die jeweiligen *Fetcher* weitergeleitet. Letztere laden die Webseiten herunter und leiten diese an Parser zur Link- und Textextraktion weiter; ungesehene URLs werden der *Frontier* hinzufügt. Werden in diesem Prozess binäre Inhalte (wie z.B. MS Word, PDF) erkannt, werden diese an einen Apache Tika basierten Parser zur Textextraktion weitergeleitet. Wird durch eine Heuristik erkannt, dass eine Webseite dynamischen Inhalt bereitstellt, d.h. Javascript Ausführung für das Laden von Inhalten benötigt, wird *Playwright* für das browsernahe Rendering einsetzt. Anschließend wird der Inhalt an sogenannte *Indexer* gesendet, die den Volltext in einem OpenSearch Cluster speichern.

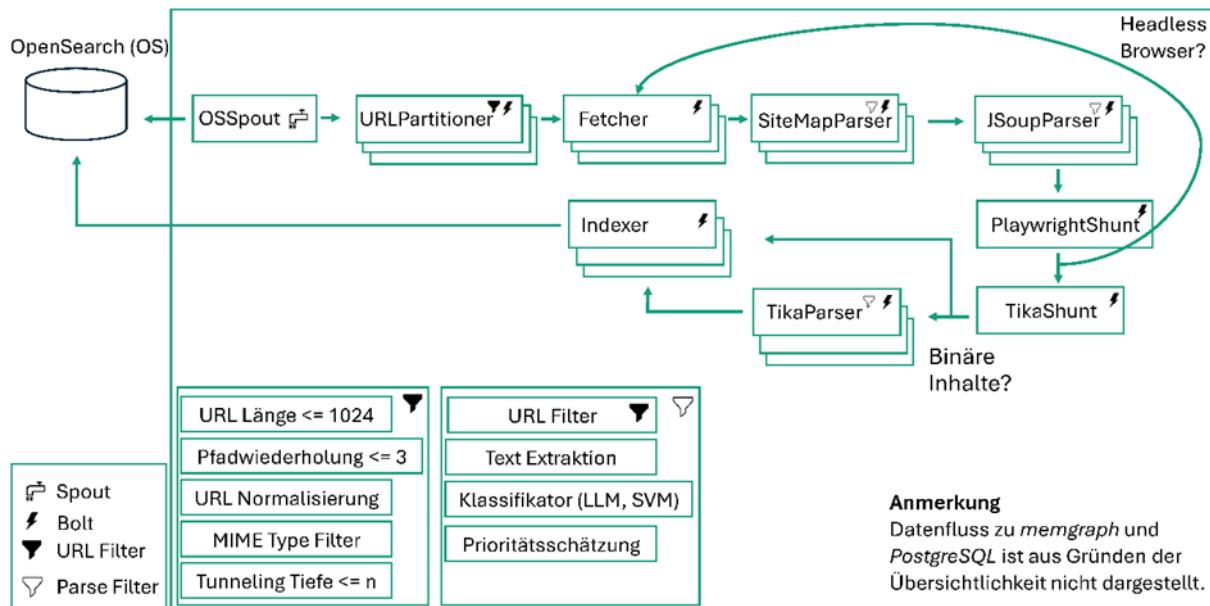


Bild 1: Architektur eines fokussierten Web-Crawlers, basierend auf Apache StormCrawler. Spouts geben Daten aus (hier: URLs), Bolts verarbeiten Daten (d.h. herunterladen, parsen und speichern die extrahierten Inhalte). Bolts können mit URL Filtern oder Parse Filtern erweitert werden

SC wurde durch das Hinzufügen von verschiedenen Bolts und Filter-Komponenten erweitert. Nachdem eine Webseite erfolgreich geparsed wurde, wird der Rohtext mit Hilfe von Boilerplate-Erkennung und XPath-Ausdrücken extrahiert. Anschließend wird er von einer Text-Klassifikationspipeline verarbeitet, um die Relevanz für das freikonfigurierbare Themengebiet zu berechnen. Wenn eine Webseite als relevant eingestuft wird, wird sie für die weitere Verarbeitung vorgemerkt. Als nächstes wird jeder URL, die auf der gegebenen Webseite enthalten ist, ein Prioritätswert zwischen 0 und 127 zugewiesen. Dies geschieht anhand (a) der Klassenwahrscheinlichkeit der aktuellen Webseite, (b) einer Überprüfung, ob die extrahierte URL auf denselben Hostname verweist, (c) der textuellen Beschreibung dieses Links und der Link-URL selbst unter Verwendung eines n-Gram-Ansatzes. Eine hohe Priorität garantiert eine frühere Verarbeitung, um die Themenlokalität bestmöglich auszunutzen.

Zusätzlich dazu wurde eine „soft focused crawling“-Strategie mit Tunneling implementiert. Ziel dieser Strategie ist es, den Web-Crawler nicht bei der ersten irrelevanten Webseite (z.B. Portalstartseite) zu stoppen, sondern die weitere Verarbeitung erst nach n weiteren Schritten abzubrechen. Hierzu verfolgt eine spezielle Filterkomponente die Crawl-Tiefe und stoppt nach

vorgegeben n irrelevanten Webseiten auf dem jeweiligen Pfad. Irrelevante Webseiten werden nicht indexiert. Um den Web-Graphen des gewählten Themas aufzubauen, verfolgt ein spezieller *Bolt* alle besuchten und entdeckten Links und fügt diese in eine *memgraph*-Graphdatenbank ein. Auf diese Weise entsteht ein themenspezifischer, host-aggregrierter Web-Graph für weitere Analysen. Für Statistiken und Metriken, die mit dem Web-Crawl zusammenhängen, aktualisiert ein weiterer *Bolt* kontinuierlich den Fortschritt in einer PostgreSQL-Datenbank. Der gesamte Prozess wird wiederholt, bis die Frontier leer ist oder manuell durch den Benutzer gestoppt wird.

2.2.3 Systemumgebung

Der in dieser Studie eingesetzte fokussierte Web-Crawler wurde auf einem Cluster bestehend aus acht virtuellen Maschinen im Frankfurter Rechenzentrum der IONOS AG betrieben. Die entsprechenden Dienste werden benötigt, um die erfassten Webseiten im laufenden Betrieb zu verarbeiten, zu analysieren sowie die einzelnen Web-Crawler Prozess zu koordinieren. Für die LLM-gestützte Inferenz wurde der IONOS Model Hub eingesetzt.

2.3 Textklassifikation

2.3.1 Support Vector Machines

SVMs sind ein etabliertes Verfahren aus dem Bereich des Maschinellen Lernens, welches in dieser Arbeit zur Textklassifikation analog zu [Joa98, ZWP20] eingesetzt wird. Die zu klassifizierenden Webseiten werden zunächst von nicht relevanten Textbestandteilen (z.B. Navigationselementen), bereinigt. Im nächsten Schritt wird der jeweilige Text tokenisiert und normalisiert. Die verbleibenden Tokens werden auf ihre Stammform reduziert, um morphologische Variationen zu minimieren. Tokens, die Stopwörter enthalten (z.B. "und", "oder", "das"), werden entfernt. Im nächsten Schritt werden die vorverarbeiteten Inhalte gemäß dem Bag-of-Words Modell in Vektoren überführt. Zur Reduktion der Dimensionalität wird in dieser Arbeit das Feature-Selection-Verfahren *Information Gain* [YP97] eingesetzt; die Termgewichtigung erfolgt mit *tfc* [SB88]. Als Softwarebibliothek für SVMs wurde *LIBSVM* eingesetzt [CL 2011].

Sowohl KI-relevante Webseiten als auch Webseiten ohne KI-relevante Inhalte werden auf diese Weise verarbeitet, um einen SVM-Klassifikator zu trainieren. Die Qualität des Klassifikators wird mit anerkannten Metriken wie *Accuracy*, *Precision* und *Recall* gemessen.

2.3.2 Large Language Models

LLMs können vielfältige Aufgaben im Bereich der Textverarbeitung übernehmen, einschließlich Textklassifikation [VS25]. Ein zentraler Vorteil von LLMs gegenüber klassischen Verfahren wie SVMs ist, dass kein spezielles Training und damit kein aufwändiges Labeln von Daten erforderlich ist. Dies geht jedoch mit höheren Inferenzzeiten und Ressourcenaufwänden einher. Für den Einsatz eines LLMs zur Textklassifikation wird ein passender Prompt formuliert, der

die Aufgabe beschreibt. Dabei stehen verschiedene Methoden der Prompt-Gestaltung zur Verfügung: (1) *Zero-Shot Prompting*, bei dem lediglich die Aufgabe übermittelt wird [GHS+23], (2) *Few-Shot Prompting*, bei dem zusätzlich zur Aufgabenbeschreibung einige Beispiele bereitgestellt werden [KGR+22], (3) *Chain-of-Thought-Prompting (CoT)*, bei dem das LLM durch schrittweises Denken zur Lösung geführt wird [WWS+22] und (4) *CARP-Prompting*, bei dem eine strukturierte Anleitung zur Reduktion von Mehrdeutigkeiten eingesetzt wird [SLL+23].

Analog zur Vorgehensweise bei SVMs werden die Webseiteninhalte zunächst bereinigt und anschließend durch das LLM klassifiziert. In dieser Arbeit wurde *Zero-Shot-Prompting* gewählt, da es bei vergleichbarer Leistung die geringste Komplexität, die schnellste Antwortzeit und die geringsten Kosten verursacht.

2.4 Topic Modelling

Analog zu [Gro22] und [JB23] wird *BERTopic* als Topic Modelling Methode eingesetzt. Die Integration aktueller LLMs gewährleistet eine zeitnahe Erkennung neuer Begriffe und möglicher Trends. Zudem unterstützt *BERTopic* mehrsprachige Analysen und bietet durch GPU-Beschleunigung eine effiziente Verarbeitung großer Datenmengen [LK24]. Die dynamische Anpassung der zu ermittelnden Themenanzahl ermöglicht einen flexiblen, datengetriebenen Ansatz für die Themenextraktion.

Unser methodischer Ansatz basiert auf einem mehrstufigen Ablauf (siehe Bild 2): Zunächst erfolgt die Textbereinigung (analog wie bei SVMs). Zur Reduktion der rechnerischen Komplexität wird das Vokabular auf Nomen beschränkt. Zusätzlich bleiben nur Wörter mit einer Mindesthäufigkeit von fünf im Textkorpus erhalten.

Anschließend werden die Texte mittels Sentence-Transformers [LZH+20] in numerische Repräsentationen (Embeddings) umgewandelt. Mittels *UMAP* [MHM18] wird die Dimensionalität dieser Embeddings weiter reduziert. Dieser Schritt ist essenziell, um die hochdimensionalen numerischen Repräsentationen der Texte auf eine niedrigere Dimension zu transformieren und somit die nachfolgende Clusterbildung zu erleichtern. Anschließend wird *HDBSCAN* [MHA17] eingesetzt, um die transformierten Embeddings zu clustern.

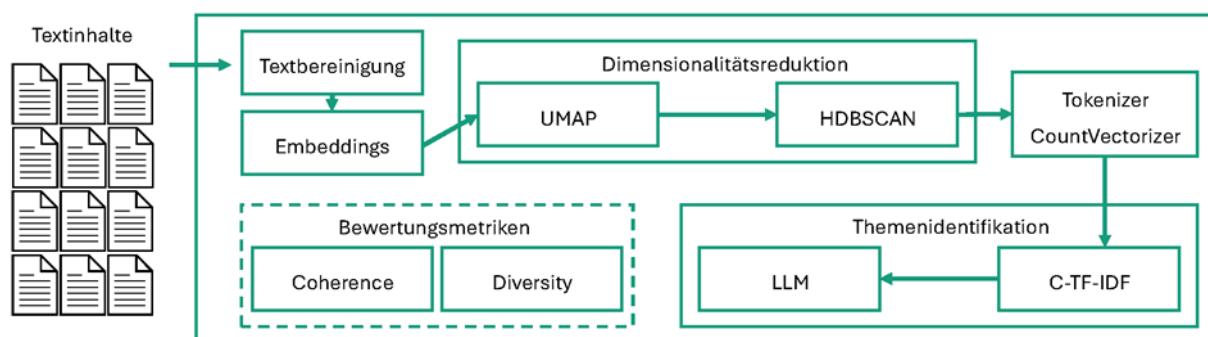


Bild 2: Ablauf Themenidentifikation mittels BERTopic (in Anlehnung an [Gro22])

Nach der Tokenisierung der Texte werden mit C-TF-IDF themenspezifische Schlüsselwörter aus den Clustern extrahiert [Gro22]. Für jedes Thema werden dabei die charakteristischsten und häufigsten Wörter identifiziert, die es am besten repräsentieren. Zur eindeutigen Bestimmung der Bedeutung und des inhaltlichen Fokus eines jeden Themas werden diese Schlüsselwörter zusammen mit den zugehörigen Originaltexten an *LLaMA 3.1 8B* [GDJ+24] übergeben. Hier erfolgt eine LLM-basierte Themenidentifikation.

Für diesen Schritt wurde ein spezifischer Prompt entworfen, der aus einem System-Prompt (SP) und einem Main-Prompt (MP) besteht:

- SP: *You are a classifier tasked with labelling a given list of keywords. Respond with a single label (under 5 words) that best describes the topic. Do not provide more than one label! Avoid explanations, alternatives, or any additional responses.*
- MP: *Respond with exactly one short label of at most 5 words for the topic. I have a set of keywords that represent the topic of these documents: '[DOCUMENTS]'. The topic is described by these keywords: '[KEYWORDS]'*.

Auf diese Weise wird gewährleistet, dass jedes Topic ein prägnantes und eindeutiges Label erhält, das die inhaltliche Essenz des jeweiligen Clusters genau widerspiegelt. Auf diese Weise wird zudem eine manuelle, menschliche Interaktion zur Benennung der Wortcluster vermieden.

Abschließend werden die extrahierten Themen anhand der Metriken *Coherence* und *Diversity* evaluiert. *Coherence* misst die semantische Ähnlichkeit der Wörter innerhalb eines Themas und bewertet dessen inhaltliche Konsistenz [Mim11]. *Diversity* hingegen gibt an, wie gut sich die einzelnen Topics inhaltlich voneinander abgrenzen [CS21]. In unserem Anwendungsfall liegt der Fokus auf einer hohen *Diversity*, um feine, neu entstehende Trends zu entdecken, die nur in wenigen ausgewählten Texten vorkommen, aber für das Trendsourcing von Bedeutung sind.

2.5 Datenakquise

2.5.1 Akquise von Seeds

Für fokussiertes Web-Crawling ist die Auswahl geeigneter, themenspezifischer Seeds essenziell. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen dieser Studie die Software *Seed me!* entwickelt. Die in Java geschriebene Software stellt konfigurierbare Suchanfragen an das Google-Such-API und bildet damit ein Standardverfahren zur Generierung von Seeds ab [RLK+16, VBD+16, PÖ11].

Bei der *Erfassung* von wissenschaftlicher, grauer Literatur nutzen wir die von der Literaturdatenbank arXiv zur Verfügung gestellten Kategorien, um nur Inhalte zu erfassen, die KI-Themen adressieren. Dabei erfassen wir die Kategorien „KI“ (cs.AI), „Machine Learning“ (cs.LG), „Computer Vision“ (cs.CV) und „Computational Linguistics“ (cs.CL). Zur Erfassung der PDF-Dokumente wird *SPIDERWISE* eingesetzt.

2.5.2 Datensätze für Maschinelles Lernen

Im Vorfeld wurde ein eintägiger Web-Crawl durchgeführt, bei dem ein *LLaMA 3.1 8B* Model zur Relevanzschätzung eingesetzt wurde. Dieses Model wurde über den IONOS Model Hub bereitgestellt. Die bei diesem Web-Crawl gesammelten Daten wurden anschließend sowohl für den Trainings- als auch für den Testkorpus genutzt.

2.5.2.1 Trainingskorpus

Der verwendete Trainingskorpus für die SVM besteht aus 5.000 Dokumenten und wurde nach den Prinzipien aus [DS11] und [DS11, WD13] konstruiert. Die entsprechende Klassenzugehörigkeit wurde a-priori durch einen Web-Crawl mit LLM-Unterstützung (*LLaMA 3.1 8B*) ermittelt und stichprobenhaft überprüft.

2.5.2.2 Testkorpus

Für die Erstellung des Testkorpus wurden 500 zufällige Texte aus diesem initialen Web-Crawl ausgewählt. Um die Validität der Testdaten zu gewährleisten, wurde bei der Auswahl der Texte darauf geachtet, dass keine Überschneidungen mit dem Trainingskorpus bestehen. Die Texte wurden manuell von sechs Personen mit KI-Fachwissen bezüglich ihrer KI-Relevanz annotiert und anschließend in einer Peer-Session durch zwei Personen kuratiert und zusammengeführt. *Fleiss-Kappa* lag bei 0,58, während das *Percent Agreement* 72,2 % betrug. Die Annotation und Kuration erfolgte in der Software *INCEPTION* [KBB+18]. Basierend auf diesem Datensatz wurde ein ausgeglichener Datensatz bestehend aus 117 Dokumenten pro Kategorie mit einer Gesamtgröße von 234 Dokumenten erstellt.

3 Ergebnisse

3.1 Seeds

Im Zeitraum 06.2024 bis 04.2025 wurden kontinuierlich Seed URLs über Seed me! erzeugt. Als Anfragen gegen das Google Search API wurden die nachfolgenden Begriffe verwendet: (a) artificial intelligence trends, (b) AI future predictions, (c) AI impact on industries, (d) AI in healthcare trends, (e) AI in finance trends, (f) AI technology advancements, (g) AI investment trends, (h) AI regulatory landscape, (i) AI ethical considerations, (j) AI job market trends.

Für diese Studie wurde die kostenfreie Version der Google Search API eingesetzt, die maximal zehn Treffer pro Anfrage zurückliefert und auf 100 Suchanfragen in einem 24 Stundenzeitfenster limitiert ist. Nach Bereinigung von Dubletten und Hostaggregation verblieben 3870 Seeds, die für die Datenakquise eingesetzt wurden.

3.2 Performance Textklassifikation

Der SVM-Textklassifikator wurde mit $n = 5.000$ Features trainiert und anhand des Testkorpus evaluiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt. Der Klassifikator erreichte eine Precision von 0,95, einen Recall von 0,70 und eine Accuracy von 0,78. 39,3 % (46/117) der KI-bezogenen Webseiten wurden von der SVM fälschlicherweise als nicht relevant klassifiziert. Andererseits wurden 4,2 % (5/117) der nicht relevanten Webseiten als KI-relevant klassifiziert.

Der LLM-basierte Klassifikator erreichte eine Precision von 0,88, einen Recall von 0,75 und eine Accuracy von 0,80. 28,2 % (33/117) der KI-bezogenen Webseiten wurden vom LLM fälschlicherweise als nicht relevant klassifiziert. Andererseits wurden 11,1 % (13/117) der nicht relevanten Webseiten als KI-relevant klassifiziert.

Tabelle 1: Evaluationsmetriken für den vorgestellten Testkorpus

		Baseline					
		Relevant	Nicht relevant	Summe	Accuracy	Precision	Recall
SVM	-	-	-	-	0,78	0,95	0,70
Relevant	112	5	117	-	-	-	-
Nicht relevant	46	71	117	-	-	-	-
Summe	158	76	234	-	-	-	-
LLM3.1 8B	-	-	-	-	0,80	0,88	0,75
Relevant	104	13	117	-	-	-	-
Nicht relevant	33	84	117	-	-	-	-
Summe	137	97	234	-	-	-	-

3.2.1 Web-Crawler-Performance

In einem experimentellen Web-Crawl mit einer Dauer von 168 Stunden wurden insgesamt 1.491.973 KI-relevante Webseiten identifiziert. Die durchschnittliche Harvest Rate in diesem Zeitraum lag bei 0,458. Der fokussierte Web-Crawler erreichte dabei eine Downloadrate zwischen 7 und 12 Webseiten pro Sekunde.

3.3 Themen und Trends

Um eine geeignete Anzahl an Themen zu bestimmen, wurde *BERTopic* mit variierenden minimalen Themengrößen ausgeführt und jeweils die *Diversity* und *Coherence* betrachtet. Bei einer minimalen Themenanzahl von 30 erreichen sowohl *Diversity* als auch *Coherence* ein hohes Niveau. Ab höheren Werten nimmt die Diversität deutlich ab. Daher wurde für die weitere Analyse eine minimale Themenanzahl von 30 für die weiteren Analysen gewählt.

Zur vertieften und benutzerfreundlichen Analyse wurden die Ergebnisse in einem interaktiven Dashboard visualisiert. *Bild 3* zeigt die entwickelte Webanwendung. Auf der linken Seite zeigt eine Themenkarte der generierten Hauptthemen, darunter die Top 5: *Privacy and Security Challenges*, *Natural Language Processing Techniques*, *Graph Neural Networks*, *Causal Graph Analysis* und *Quantum Computing Technology*. In der unteren linken Ecke wird zusätzlich die zeitliche Entwicklung der Themenanzahl dargestellt.

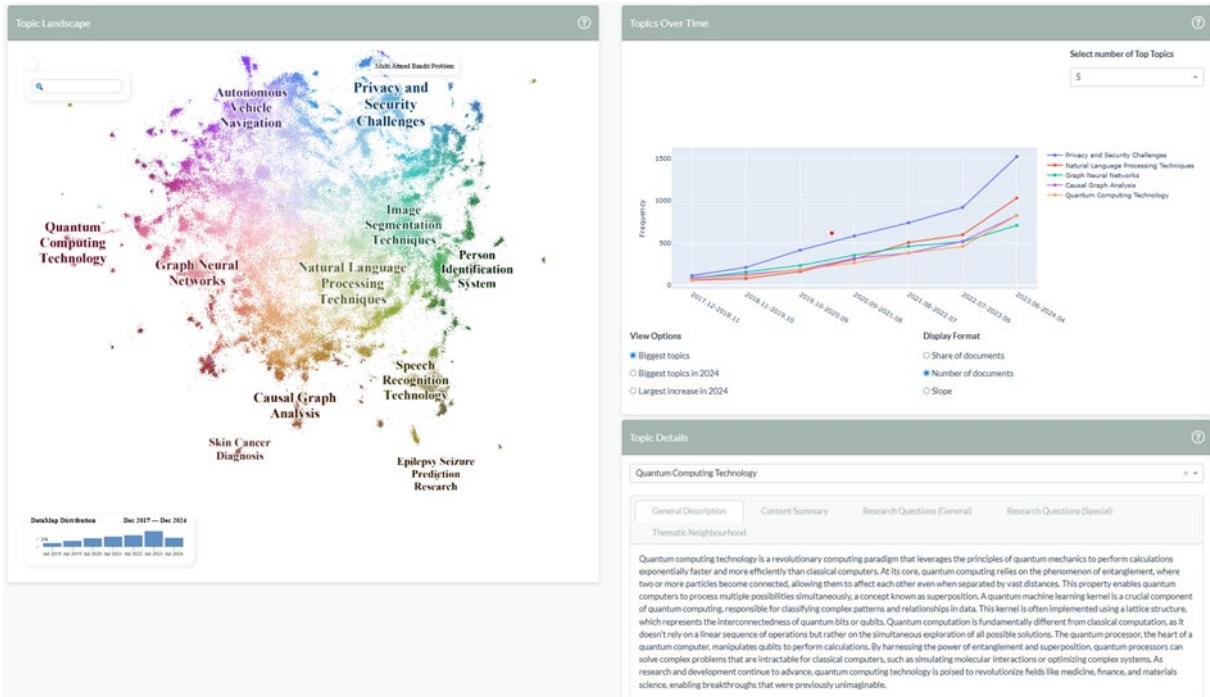


Bild 3: Trendscouting Dashboard als Web-Anwendung

Im oberen rechten Bereich wird eine zeitliche Analyse aller generierten Themen dargestellt, die Veränderungen in ihrer Relevanz über den Zeitverlauf sichtbar macht. Nutzer können dabei eine beliebige Anzahl an Top-Themen auswählen. Die Optionen *Biggest Topics*, *Biggest Topics in 2024* und *Largest Increase in 2024* ermöglichen eine differenzierte Betrachtung der wichtigsten und am stärksten wachsenden Themen. Letztere Darstellung, basierend auf der Steigung (Slope), zeigt, dass die meisten der im Jahr 2024 am stärksten wachsenden Themen im Bereich Natural Language Processing (NLP) liegen. Die vorderen Plätze belegen u. a. Natural Language Processing Technology, Language Model Evaluation und *Language Safety and Toxicity*. Dies spiegelt die zunehmende Aufmerksamkeit gegenüber GenAI bzw. LLMs in der breiten Öffentlichkeit wider.

Im unteren rechten Bereich werden detaillierte Beschreibungen zu jedem Thema präsentiert. Dabei werden sowohl die Inhalte der Veröffentlichungen als auch die Schlüsselwörter der Themen verwendet, um mit Hilfe eines LLMs verschiedene Aspekte der Themen im Detail zu beleuchten. Ergänzend wird für jedes Thema die thematische Nachbarschaft visualisiert, die Zusammenhänge zu verwandten Themen aufzeigt und so eine kontextuelle Einordnung des jeweiligen Themas ermöglicht.

4 Diskussion & Ausblick

4.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass fokussiertes Web-Crawling unter Einsatz von LLMs zur Textklassifikation Fortschritte bei der effizienten Erfassung und Analyse themenspezifischer Webinhalte sowie bei der frühzeitigen Erkennung und Beobachtung von Trends ermöglicht.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass traditionelle maschinelle Lernverfahren wie SVMs eine hohe Präzision erzielen, allerdings auf gut annotierte Trainingsdaten angewiesen sind und dennoch Schwächen im Recall aufweisen. Im Gegensatz dazu benötigen LLMs keine umfangreichen Trainingsdaten, bieten eine vielversprechende Alternative und liefern akzeptable Ergebnisse. Vor diesem Hintergrund erscheint ein hybrider Ansatz besonders vielversprechend, bei dem LLMs zur effizienten Datengenerierung eingesetzt werden, um darauf aufbauend leistungsstarke SVM-Modelle zu trainieren.

4.2 Limitationen

Für diese Arbeit bestehen mehrere Einschränkungen. Die verfügbare Datenmenge zur Validierung des SVM-Modells und des LLM ist vergleichsweise gering. Obwohl die Testdaten manuell kuratiert wurden und aus authentischen Webquellen stammen, wodurch eine hohe Qualität gegeben ist, begrenzt die geringe Größe des Korpus die Aussagekraft der Klassifikator-Performance. Sowohl die SVM- als auch die LLM-Modelle zeigten eine ähnliche Genauigkeit, unterscheiden sich jedoch in den Inferenzenzeiten. Dies macht den Ansatz vielversprechend, zunächst LLMs für die Datengenerierung einzusetzen und darauf aufbauend effizientere SVM-Modelle zu trainieren, um den Durchsatz des Systems zu steigern. Zudem stellen API-Limitationen beim Einsatz externer LLM-Dienste sowie der vergleichsweise hohe Rechenaufwand und die Kosten im Vergleich zu SVM-Modellen weitere Einschränkungen dar, die insbesondere bei skalierter Anwendung berücksichtigt werden müssen.

Die Crawling-Dauer von etwa einer Woche ist zudem kurz, insbesondere im Hinblick auf die Erfassung von Zeitreihendaten. Eine längere Beobachtungsperiode wäre notwendig, um aussagekräftigere und belastbarere Aussagen zur Entwicklung und Leistungsfähigkeit des Systems über die Zeit hinweg treffen zu können. Darüber hinaus könnte, wie von [VBD+16] vorgeschlagen, eine tiefgreifende Analyse des durch das Web-Crawling entstandenen host-aggregierten Web-Graphs durchgeführt werden, um die Ergebnisse insbesondere mit Hinblick auf eine repräsentative Themenerfassung weiterhin methodisch abzusichern. Dennoch liefern die bisherigen Ergebnisse bereits erste positive Hinweise auf die Stabilität und Effektivität des vorgestellten Ansatzes.

Eine systematische Validierung der identifizierten Themen und Trends, etwa durch Expertenbefragungen, wurde bislang noch nicht durchgeführt. Dieser Schritt ist jedoch entscheidend für zukünftige Untersuchungen, um die Generalisierbarkeit und Validität des Ansatzes im Vergleich zu etablierten Verfahren fundiert zu bestätigen. Zudem könnte die Auswahl der Seed-Seiten das Themenspektrum nur unzureichend abdecken, da diese auf spezifischen Abfragen

gegenüber Google basieren. Dadurch wird die Vielfalt der erfassten Themen und somit die Repräsentativität des Datensatzes möglicherweise eingeschränkt.

4.3 Vergleich zu Vorarbeiten

Fokussierte Web-Crawler werden in verschiedenen Anwendungsbereichen eingesetzt, wobei die erzielte HR je nach Methode und Zielgebiet variieren. Rheinländer et al. erreichten mit einem Naive Bayes Klassifikator bei der Sammlung englischsprachiger biomedizinischer Webinhalte eine HR von 38 % [RLK+16]. Zowalla et al. setzten einen SVM Ansatz für deutschsprachige Gesundheitswebseiten ein und erzielten eine HR von 21,2 % [ZWP20]. Sakai et al. erreichten bei der automatischen Erkennung japanischer „Fake Shops“ mit klassischen maschinellen Lernverfahren eine HR von über 20 % [STK+23], während [RN23] mit SVR eine HR von 37 % berichteten.

Unsere Ergebnisse weisen eine Harvest Rate von 45,8 % auf, was im typischen Bereich vergleichbarer fokussierter Web-Crawler liegt. Trotz möglicher Einflussfaktoren, die die Harvest Rate beeinflussen könnten, unterstreicht dies die Effektivität unseres Ansatzes.

Die vorliegende Arbeit zeigt zudem, dass LLMs im Kontext des Trendscoutings nicht nur – wie häufig in der Literatur betont – zur Analyse von Daten, sondern auch in Verbindung mit gezieltem Web-Crawling zur Datenerhebung eingesetzt werden kann. Die Validität unseres Ansatzes spiegelt sich auch in der durch *BERTopic* ermöglichten Interpretierbarkeit der gesammelten Daten wider, die mit jener von Studien vergleichbar ist, in denen die Datenerhebung ohne den Einsatz von KI erfolgte [KW:24, JB23].

4.4 Ausblick und zukünftige Forschungsperspektiven

Ein zentraler nächster Schritt besteht in der systematischen Validierung der identifizierten Themen und Trends mittels etablierter Verfahren, wie beispielsweise Expertenbefragungen oder Benchmark-Vergleichen mit traditionellen Methoden. Diese Validierung ist entscheidend, um die Generalisierbarkeit und Verlässlichkeit unseres KI-gestützten Ansatzes im Vergleich zu klassischen Verfahren belegen zu können. Darüber hinaus bietet der Einsatz von *Active Learning* Methoden mit LLMs [XMX+25] großes Potenzial, den fokussierten Web-Crawling-Prozess kontinuierlich zu verbessern. Durch gezielte menschliche Rückmeldungen können die Prompts der generativen Modelle und die nachgeschalteten SVMs iterativ optimiert werden. Ein solcher zyklischer Lernprozess – LLM zur Datengenerierung, SVM zum effizienten Klassifizieren, Rückkopplung der Ergebnisse zur weiteren Verfeinerung der LLMs – ermöglicht eine adaptive und zunehmend präzisere Datenakquise und Klassifikation.

Der Einsatz von LLMs beim fokussierten Web-Crawling eröffnet zudem die Perspektive, wesentlich flexibler und kundenspezifischer auf unterschiedliche Anforderungen reagieren zu können. Durch die Fähigkeit, semantisch relevante Inhalte gezielt zu erkennen und dynamisch auf neue Themenlagen einzugehen, lassen sich sowohl die Effizienz der Datenerfassung als auch die Qualität der Analyse steigern. Dies macht diesen Ansatz besonders attraktiv für Anwendungen im Trendscouting und der technologischen Vorausschau, bei denen Aktualität und Themenvielfalt von hoher Bedeutung sind.

Zukünftige Forschungen sollten daher neben der Validierung auch die Erweiterung des fokussierten Web-Crawling über längere Zeiträume hinweg in den Fokus nehmen, um belastbare Zeitreihendaten zu generieren und so die Entwicklung und Identifikation von Trends noch besser abzubilden. Zudem könnte die Diversifizierung der Seed-Seiten und die Integration weiterer Datenquellen dazu beitragen, die Repräsentativität und Breite der erfassten Themen zu erhöhen.

Literatur

[AW24] AHLUWALIA, A.; WANI, S.: Leveraging Large Language Models for Web Scraping. arXiv, 2024

[BNJ03] BLEI, D. M.; NG, A. Y.; JORDAN, M. I.: Latent dirichlet allocation. Journal of machine Learning research, (3)Jan, 2003, S. 993–1022

[BP12] BRIN, S.; PAGE, L.: Reprint of: The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine. Computer Networks, (56)18, 2012, S. 3825–3833

[BRR+24] BENFENATI, D.; RINALDI, A.; RUSSO, C.; TOMMASINO, C.: GenCrawl: A Generative Multimedia Focused Crawler for Web Pages Classification: Proceedings of the 16th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management. 16th International Conference on Knowledge Discovery and Information Retrieval, 17.11.2024 - 19.11.2024, Porto, Portugal, SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2024, S. 91–101

[CL 2011] CHANG, C.-C.; LIN, C.-J.: LIBSVM. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, (2)3, 2011, S. 1–27

[CS21] CHAUHAN, U.; SHAH, A.: Topic modeling using latent Dirichlet allocation: A survey. ACM Computing Surveys (CSUR), (54)7, 2021, S. 1–35

[CvD99] CHAKRABARTI, S.; VAN DEN BERG, M.; DOM, B.: Focused crawling: a new approach to topic-specific Web resource discovery. Computer Networks, (31)11-16, 1999, S. 1623–1640

[Dav00] DAVISON, B. D.: Topical locality in the Web. In: Yannakoudakis, E.; Belkin, N. J.; Leong, M.-K.; Ingwersen, P. (Hrsg.): Proceedings of the 23rd annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval. SIGIR00: 23rd ACM International SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, 24 07 2000 28 07 2000, Athens Greece, ACM, New York, NY, USA, 2000, S. 272–279

[DS11] DOBBIN, K. K.; SIMON, R. M.: Optimally splitting cases for training and testing high dimensional classifiers. BMC medical genomics, (4), 2011, S. 31

[DSL+ 2025] DAHLKE, J.; SCHMIDT, S.; LENZ, D.; KINNE, J.; DEHGHAN, R.; ABBASIHAROFTEH, M.; SCHÜTZ, M.; KRIESCH, L.; HOTTENROTT, H.; KANILMAZ, U. N.; GRASHOF, N.; HAJIKHANI, A.; LIU, L.; RICCABONI, M.; BALLAND, P.-A.; WÖRTER, M.; RAMMER, C.: The WebAI Paradigm of Innovation Research: Extracting Insight from Organizational Web Data Through AI – The WebAI Paradigm of Innovation Research: Extracting Insight from Organizational Web Data Through AI, 2025

[DSL+23] DUMBACH, P.; SCHWINN, L.; LÖHR, T.; ELSBERGER, T.; ESKOFIER, B. M.: Artificial intelligence trend analysis in German business and politics: a web mining approach. International Journal of Data Science and Analytics, 2023

[Eic95] EICHMANN, D.: Ethical Web agents. Computer Networks and ISDN Systems, (28)1-2, 1995, S. 127–136

[FNB24] FERRÀS, X.; NYLUND, P.; BREM, A.: Connecting The (Invisible) Dots. In: Chesbrough, H.; Radziwon, A.; Vanhaverbeke, W.; West, J. (Hrsg.): The Oxford Handbook of Open Innovation. Oxford University Press, 2024, S. 519–532

[GDJ+24] GRATTAFIORI, A.; DUBEY, A.; JAUHRI, A.; PANDEY, A.; KADIAN, A.; AL-DAHLE, A.; LETMAN, A.; MATHUR, A.; SCHELTON, A.; VAUGHAN, A.: The llama 3 herd of models. arXiv preprint arXiv:2407.21783, 2024

[GHS+23] GRETZ, S.; HALFON, A.; SHNAYDERMAN, I.; TOLEDO-RONEN, O.; SPECTOR, A.; DANKIN, L.; KATSIS, Y.; ARVIV, O.; KATZ, Y.; SLONIM, N.; EIN-DOR, L.: Zero-shot Topical Text Classification with LLMs - an Experimental Study. In: BOUAMOR, H.; PINO, J.; BALI, K. (Hrsg.): *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2023*. Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2023, Singapore, Association for Computational Linguistics, Stroudsburg, PA, USA, 2023, S. 9647–9676

[Gro22] GROOTENDORST, M.: BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure. arXiv preprint arXiv:2203.05794, 2022

[Gro22] GROOTENDORST, M.: BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure, 2022w

[HG 2015] HINES, A.; GOLD, J.: An organizational futurist role for integrating foresight into corporations. *Technological Forecasting and Social Change*, (101), 2015, S. 99–111

[HSM24] HAN, B.; SUSNIK, T.; MATHRANI, A.: Automating Systematic Literature Reviews with Retrieval-Augmented Generation: A Comprehensive Overview. *Applied Sciences*, (14)19, 2024, S. 9103

[Hua25] HUANG, C.-J.: The Synergy of Automated Pipelines with Prompt Engineering and Generative AI in Web Crawling. arXiv, 2025

[JB23] JIN, B.; BAE, Y.: Prospective Research Trend Analysis on Zero-Energy Building (ZEB): An Artificial Intelligence Approach. *Sustainability*, (15)18, 2023, S. 13577

[Joa98] JOACHIMS, T.: Text categorization with Support Vector Machines: Learning with many relevant features. In: Carbonell, J. G.; Siekmann, J.; Goos, G.; Hartmanis, J.; Van Leeuwen, J.; Nédellec, C.; Rouveiro, C. (Hrsg.): *Machine Learning: ECML-98. Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1998, S. 137–142

[KBB+18] KLIE, J.-C.; BUGERT, M.; BOULLOSA, B.; ECKART DE CASTILHO, R.; GUREVYCH, I.: The INCEPTION Platform: Machine-Assisted and Knowledge-Oriented Interactive Annotation. In: Zhao, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 27th International Conference on Computational Linguistics: System Demonstrations*. Association for Computational Linguistics, Santa Fe, New Mexico, 2018, S. 5–9

[KBR17] KUMAR, M.; BHATIA, R.; RATTAN, D.: A survey of Web crawlers for information retrieval. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, (7)6, 2017

[KGR+22] KOJIMA, T.; GU, S. S.; REID, M.; MATSUO, Y.; IWASAWA, Y.: Large Language Models are Zero-Shot Reasoners. arXiv, 2022

[KW:24] KUMAR, D.; WEISSENBERGER-EIBL, M.; UNAV: Artificial Intelligence Driven Trend Forecasting: Integrating BERT Topic Modelling and Generative Artificial Intelligence for Semantic Insights. Fraunhofer-Gesellschaft, 2024

[Liu11] LIU, B.: *Web Data Mining*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011

[LK24] LEE, Y.-G.; KIM, S.: A Comparative Study on Topic Modeling of LDA, Top2Vec, and BERTopic Models Using LIS Journals in WoS. *Journal of the Korean Society for Library and Information Science*, (58)1, 2024, S. 5–30

[LWN+24] LESMANA, R.; WIJAYA, I.; NABILA, E. A.; AGUSTIAN, H.; AUDIAH, S.; FATURAHMAN, A.: Enhancing Market Trend Analysis Through AI Forecasting Models. *International Journal of Cyber and IT Service Management*, (4)2, 2024, S. 105–113

[LZH+20] LI, B.; ZHOU, H.; HE, J.; WANG, M.; YANG, Y.; LI, L.: On the sentence embeddings from pre-trained language models. arXiv preprint arXiv:2011.05864, 2020

[Men04] MENCZER, F.: Lexical and semantic clustering by Web links. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, (55)14, 2004, S. 1261–1269

[Men05] MENCZER, F.: Mapping the Semantics of Web Text and Links. *IEEE Internet Computing*, (9)3, 2005, S. 27–36

[MHA17] MCINNES, L.; HEALY, J.; ASTELS, S.: hdbscan: Hierarchical density based clustering. *J. Open Source Softw.*, (2)11, 2017, S. 205

[MHM18] MCINNES, L.; HEALY, J.; MELVILLE, J.: Umap: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction. *arXiv preprint arXiv:1802.03426*, 2018

[Mim11] MIMNO, D., WALLACH, H., TALLEY, E., LEENDERS, M., & MCCALLUM: Optimizing semantic coherence in topic models, 2011

[MMB14] MEUSEL, R.; MIKA, P.; BLANCO, R.: Focused Crawling for Structured Data. In: Li, J.; Wang, X. S.; Garofalakis, M.; Soboroff, I.; Suel, T.; Wang, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 23rd ACM International Conference on Conference on Information and Knowledge Management. CIKM '14: 2014 ACM Conference on Information and Knowledge Management, 03 11 2014 07 11 2014, Shanghai China*, ACM, New York, NY, USA, 2014, S. 1039–1048

[MSA+ 2025] MATAMOROS-ECHEVERRIA, K. L.; SANCHEZ-LEON, E. R.; ARISTEGA-ZUÑIGA, A. A.; CÁRDENAS-RODRÍGUEZ, M. M.; PERALTA-GAMBOA, D. A.: The Impact of Artificial Intelligence on the Digital Economy: Advances and Challenges - A Systematic Literature Review. *Journal of Posthumanism*, (5)2, 2025

[PFN 2023] PLEKHANOV, D.; FRANKE, H.; NETLAND, T. H.: Digital transformation: A review and research agenda. *European Management Journal*, (41)6, 2023, S. 821–844

[PÖ11] PRASATH, R.; ÖZTÜRK, P.: Finding Potential Seeds through Rank Aggregation of Web Searches. In: Kuznetsov, S. O.; Mandal, D. P.; Kundu, M. K.; Pal, S. K. (Hrsg.): *Pattern Recognition and Machine Intelligence. Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011, S. 227–234

[RFB+21] RODRIGUES, A. P.; FERNANDES, R.; BHANDARY, A.; SHENOY, A. C.; SHETTY, A.; ANISHA, M.: Real-Time Twitter Trend Analysis Using Big Data Analytics and Machine Learning Techniques. *Wireless Communications and Mobile Computing*, (2021)1, 2021

[RK 2018] ROHRBECK, R.; KUM, M. E.: Corporate foresight and its impact on firm performance: A longitudinal analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, (129), 2018, S. 105–116

[RLK+16] RHEINLÄNDER, A.; LEHMANN, M.; KUNKEL, A.; MEIER, J.; LESER, U.: Potential and Pitfalls of Domain-Specific Information Extraction at Web Scale. In: Özcan, F.; Koutrika, G.; Madden, S. (Hrsg.): *Proceedings of the 2016 International Conference on Management of Data. SIGMOD/PODS'16: International Conference on Management of Data, 26 06 2016 01 07 2016, San Francisco California USA*, ACM, New York, NY, USA, 2016, S. 759–771

[RN23] RAJIV, S.; NAVANEETHAN, C.: An Optimal Topic Centric Crawler for Acquiring Bio-medical Themes Utilizing Gaussian Support Vector Regression. *SN Computer Science*, (4)6, 2023

[Roh14] ROHRBECK, R.: Trend Scanning, Scouting and Foresight Techniques. In: Gassmann, O.; Schweitzer, F. (Hrsg.): *Management of the Fuzzy Front End of Innovation*. Springer International Publishing, Cham, 2014, S. 59–73

[SB88] SALTON, G.; BUCKLEY, C.: Term-weighting approaches in automatic text retrieval. *Information Processing & Management*, (24)5, 1988, S. 513–523

[SHS+21] SCHUH, G.; HICKING, J.; STROH, M.-F.; BENNING, J.; GNANARAJ, C.: *FEASIBILITY Analysis of Entity Recognition as a Means to Create an Autonomous Technology Radar*. Hannover publishing, 2021

[SLL+23] SUN, X.; LI, X.; LI, J.; WU, F.; GUO, S.; ZHANG, T.; WANG, G.: Text Classification via Large Language Models. *arXiv*, 2023

[STK+23] SAKAI, K.; TAKESHIGE, K.; KATO, K.; KURIHARA, N.; ONO, K.; HASHIMOTO, M.: An Automatic Detection System for Fake Japanese Shopping Sites Using fastText and LightGBM. *IEEE Access*, (11), 2023, S. 111389–111401

[VBD+16] VIEIRA, K.; BARBOSA, L.; DA SILVA, A. S.; FREIRE, J.; MOURA, E.: Finding seeds to bootstrap focused crawlers. *World Wide Web*, (19)3, 2016, S. 449–474

[vBK16] VAN DEN BOSCH, A.; BOGERS, T.; KUNDER, M. DE: Estimating search engine index size variability: a 9-year longitudinal study. *Scientometrics*, (107), 2016, S. 839–856

[VS25] VAIJALA, S.; SHIMANGAUD, S.: Text Classification in the LLM Era—Where do we stand? arXiv, 2025

[WD13] WEI, Q.; DUNBRACK, R. L.: The role of balanced training and testing data sets for binary classifiers in bioinformatics. *PloS one*, (8)7, 2013, e67863

[WWS+22] WANG, X.; SCHUURMANS, D.; BOSMA, M.; ICHTER, B.; XIA, F.; CHI, E. H.; LE, Q. V.; ZHOU, D.: Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models: Proceedings of the 36th International Conference on Neural Information Processing Systems. NIPS '22, Curran Associates Inc, Red Hook, NY, USA, 2022

[XMX+25] XIA, Y.; MUKHERJEE, S.; XIE, Z.; WU, J.; LI, X.; APONTE, R.; LYU, H.; BARROW, J.; CHEN, H.; DERNONCOURT, F.; KVETON, B.; YU, T.; ZHANG, R.; GU, J.; AHMED, N. K.; WANG, Y.; CHEN, X.; DEILAMSALEHY, H.; KIM, S.; HU, Z.; ZHAO, Y.; LIPKA, N.; YOON, S.; HUANG, T.-H. K.; WANG, Z.; MATHUR, P.; PAL, S.; MUKHERJEE, K.; ZHANG, Z.; PARK, N.; NGUYEN, T. H.; LUO, J.; ROSSI, R. A.; MCAULEY, J.: From Selection to Generation: A Survey of LLM-based Active Learning, 2025

[YP97] YANG, Y.; PEDERSEN, J. O.: A comparative study on feature selection in text categorization. *Icml*, 412-420, 1997, S. 35

[ZWP20] ZOWALLA, R.; WETTER, T.; PFEIFER, D.: Crawling the German Health Web: Exploratory Study and Graph Analysis. *Journal of medical Internet research*, (22)7, 2020, e17853

Autoren

Dr. Richard Zowalla ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Team Cognitive Service im Forschungsbereich Kognitive Dienstleistungssysteme am Fraunhofer IAO in Heilbronn. Er promovierte als Dr. sc. hum. im Bereich Medizinische Informatik an der Universität Heidelberg im Bereich des fokussierten Web-Crawling. Zu seinen Kernkompetenzen zählen Softwareentwicklung, Web Data Mining sowie der Einsatz von Open Source Software. Zudem ist er Mitglied der Apache Software Foundation und der aktuelle Chair des Apache StormCrawler Projekts.

Jan Mackensen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Team Automated Service Interactions im Forschungsbereich Kognitive Dienstleistungssysteme am Fraunhofer IAO in Heilbronn. Er hat einen Masterabschluss (M. Sc.) in Cognitive Science und spezialisiert sich auf Machine Learning, Künstliche Intelligenz, Natural Language Processing sowie Kognitionswissenschaft.

Jin Meng ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Team Cognitive Distribution Systems im Forschungsbereich Kognitive Dienstleistungssysteme am Fraunhofer IAO in Heilbronn. Sie verfügt über einen Masterabschluss (M. Sc.) und bringt ihre Erfahrung in den Bereichen Machine Learning, Deep Learning sowie Datenanalyse und -visualisierung ein die Forschung ein.

Kristian Schaefer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Team Cognitive Service Technologies im Forschungsbereich Kognitive Dienstleistungssysteme am Fraunhofer IAO in Heilbronn. Er verfügt über einen Masterabschluss (M. Sc.) und ist spezialisiert auf Softwarearchitekturen im Bereich IoT und Cloud. Seine Kernkompetenzen umfassen IoT-/Cloud-Anwendungen, Datenverarbeitung und -analysen, Softwareentwicklung sowie Embedded Systems.

Dr. Safa Omri leitet das Team für Cognitive Service Technologies im Forschungsbereich Kognitive Dienstleistungssysteme am Fraunhofer IAO in Heilbronn. Sie ist auf Smart Scheduling, angewandte KI für industrielle Systeme sowie die digitale Service-Transformation spezialisiert. Safa Omri promovierte in Mathematik und Informatik am Karlsruher Institut für Technologie

(KIT), wobei sie sich auf qualitätsbewusste Testfall Priorisierung mithilfe datengetriebener und Reinforcement Learning-basierter Methoden in industriellen Umgebungen konzentrierte.

Dr. Jens Neuhüttler leitet den Forschungsbereich Kognitive Dienstleistungssysteme am Fraunhofer IAO in Heilbronn und Stuttgart. Er promovierte in Ingenieurwissenschaften an der Universität Stuttgart und war Visiting Researcher an der Universität Cambridge. Seit mehr als zehn Jahren beschäftigt er sich in angewandten Forschungs- und Beratungsprojekten mit der systematischen Entwicklung innovativer, datenbasierter Dienstleistungen und Geschäftsmodelle in verschiedenen Branchen.

Session IV

Akzeptanz von KI-Lösungen: Analyse der Einflussfaktoren und ihre Relevanz für Mitarbeitende

***Verena Dondorf¹, Kitrujan Kokilanathan¹, Jannis Graunke¹,
Daniela Hobscheidt¹, Roman Dumitrescu²***

¹ *Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM, verena.dondorf@iem.fraunhofer.de,
kitrujan.kokilanathan@iem.fraunhofer.de, jannis.graunke@iem.fraunhofer.de,
daniela.hobscheidt@iem.fraunhofer.de*

² *Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn, roman.dumitrescu@jni.uni-paderborn.de*

Zusammenfassung

Der zunehmende Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) in der Gesellschaft stellt Unternehmen vor die Herausforderung, Implementierungsprozesse ganzheitlich zu gestalten. Dabei müssen technische, organisationale und insbesondere menschliche Aspekte berücksichtigt werden, um bestmögliche Effizienzgewinne zu erzielen. Dieses Paper konzentriert sich auf die Perspektive der Mitarbeitenden, da fehlende Einbindung und mangelndes Verständnis Unsicherheiten hervorrufen können, die zu einer ablehnenden Haltung gegenüber KI führen. Untersucht wurde mit einer Befragung (n=240), welchen Einfluss verschiedene Faktoren auf die wahrgenommene Nutzung von KI am Arbeitsplatz haben. Die Nutzungsbereitschaft wurde mithilfe des Technology Acceptance Model (TAM) erfasst und mittels Regressionsanalyse ausgewertet. Zusätzlich wurde erhoben, inwieweit diese Einflussfaktoren aus Sicht der Mitarbeitenden bereits in ihren Unternehmen erfüllt sind. Das Paper zeigt den Impact der einzelnen Einflussfaktoren im Unternehmen auf und daraus resultierende Maßnahmen. Beispielsweise wird deutlich, wie wichtig es ist, dass Mitarbeitende das Ziel und den Mehrwert der Implementierung kennen. Diese Ergebnisse münden in einem Handlungsleitfaden, der Unternehmen bei der Implementierung einer KI unterstützen kann. Die Ergebnisse aus dem Paper stammen aus dem Projekt: Kompetenzzentrum Arbeitswelt.Plus.

Schlüsselworte

Künstliche Intelligenz, Strategie, Technologieakzeptanz, Mitarbeitereinbindung

Acceptance of AI solutions: Analysis of influencing factors and their relevance for employees

Abstract

The increasing use of artificial intelligence (AI) in society presents companies with the challenge of designing implementation processes in a holistic manner. Technical, organisational and, in particular, human aspects must be taken into account in order to achieve the best possible efficiency gains. This paper focuses on the perspective of employees, as a lack of involvement and understanding can cause uncertainty, leading to a negative attitude towards AI. A survey ($n=240$) was conducted to investigate the influence of various factors on the perceived use of AI in the workplace. The willingness to use AI was measured using the Technology Acceptance Model (TAM) and evaluated using regression analysis. In addition, the extent to which these influencing factors are already fulfilled in the companies from the employees' perspective was surveyed. The paper shows the impact of the individual influencing factors in the company and the resulting measures. For example, it becomes clear how important it is for employees to understand the goal and added value of implementation. These results will be compiled into a set of guidelines to help companies implement AI. The results from the paper come from the project: Kompetenzzentrum Arbeitswelt.Plus.

Keywords

Artificial intelligence, strategy, technology acceptance, employee engagement

1 Einleitung: KI-Nutzung im Mittelstand

1.1 Wettbewerbsfähigkeit

Unternehmen stehen heutzutage vor der Herausforderung, ihre Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. Wettbewerbsfähigkeit beschreibt dabei die Fähigkeit eines Unternehmens, sich am Markt gegenüber Mitbewerbern zu behaupten, indem es effizienter arbeitet, innovativ bleibt und schnell auf Veränderungen reagiert. Gerade in einem zunehmend dynamischen und globalisierten Umfeld ist sie entscheidend, um Wachstum und langfristigen Erfolg zu sichern [BC15]. Besonders in Deutschland ist hierbei ein negativer Trend zu erkennen, da die Unternehmensinsolvenzen steigen und ein Rückgang des Bruttoinlandsprodukts pro Arbeitsstunde zu erkennen ist. Zudem befindet sich Deutschland laut dem Innovationsindikator 2024 nur noch auf Platz 12 von 35 [FRS+24], [Kla24]. Eine Möglichkeit, die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen zu erhalten bzw. zu steigern, liegt in der Nutzung neuer Technologien.

Diese Technologien besitzen das Potenzial, klassische Organisationsstrukturen grundlegend zu verändern, indem sie Abläufe effizienter gestalten und die menschliche Produktivität deutlich steigern [DWN23]. Dabei geht es nicht nur um Automatisierung einfacher Routineaktivitäten, sondern auch um die Fähigkeit, neue Geschäftsmodelle zu entwickeln und Marktbeziehungen nachhaltig neu auszurichten. **Künstliche Intelligenz (KI)** nimmt hier eine Schlüsselrolle ein, weil sie über reine Prozessoptimierung hinausgeht und durch generative Modelle völlig neue Einkommensquellen erschließt [Cla17]. So zeigen Studien, dass Generative KI, ein Teilbereich von KI der darauf spezialisiert ist neue Inhalte zu generieren, Unternehmensparadigmen stören und strategische Neuausrichtungen vorantreiben kann, was Firmen zu mehr Innovation und Wachstum verhilft. Im AI Index Report 2025 geben 75 Prozent der befragten Unternehmen an, dass KI einen starken Einfluss auf ihre Branche haben wird, während 67 Prozent KI als Zukunftstechnologie einstufen [MFP+24], [SC25]. Damit wird KI zu einer der wichtigsten neuen Technologien, um Unternehmen zu helfen, ihre Wettbewerbsfähigkeit im dynamischen Marktumfeld zu erhalten. Somit ist eine erfolgreiche Einführung von KI für Unternehmen unerlässlich, um ihre Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu erhalten und stärken [RBP+22].

1.2 KI-Einführung im Unternehmen

Dabei ist diese Einführung im Unternehmen nicht trivial, wenn positive Effekte erreicht werden sollen [AKA25]. Die erfolgreiche Einführung generativer KI Systeme wird oft durch unzureichende technische Infrastruktur und fehlende Ressourcen erschwert. Kleine und mittlere Unternehmen stehen besonders vor dem Problem mangelnder IT-Kompatibilität und fehlender Expertise [KBO24]. Rechtliche und ethische Fragen sowie Unsicherheiten in Governance und Kontrolle der KI-Inhalte verkomplizieren den Roll-out zusätzlich. Dabei geben nur 17 Prozent der deutschen Unternehmen an, dass sie sich sicher sind, dass ihre Mitarbeitenden alle benötigten Fähigkeiten haben, um eine KI voll zu nutzen [HKM25]. Diese Zahl zeigt, dass viele Unternehmen noch nicht gut aufgestellt sind, damit KI genutzt werden kann.

Dies ist eine Herausforderung, da es für die vollständige Nutzung einer KI wichtig ist, dass der Mensch bereit dazu ist, diese zu nutzen. Aktuell haben noch 43 Prozent der Mitarbeitenden Angst vor der neuen Technologie und wollen KI laut einer BITKOM Studie nicht in ihrem Beruf nutzen [SC25]. Nur durch menschenzentrierte Gestaltung, die unterschiedliche Vorkenntnisse und ethische Standards einbezieht, kann langfristig Vertrauen aufgebaut werden [BHI+25]. Somit ist es wichtig zu wissen, wie die Akzeptanz beeinflusst werden kann.

1.3 Das Technologieakzeptanz-Modell

Wie im vorherigen Abschnitt hergeleitet ist es wichtig zu wissen, wie Akzeptanz beeinflusst wird. Das **Technology Acceptance Model (TAM)** (siehe Bild- 1) analysiert, wie wahrgenommener Nutzen und Benutzerfreundlichkeit die Akzeptanz neuer Technologien beeinflussen [Dav89]. Positive Einstellungen entstehen, wenn Anwender den Eindruck gewinnen, dass Gen KI-Tools ihnen echte Erleichterung bieten und leicht zu bedienen sind [MSM+24].

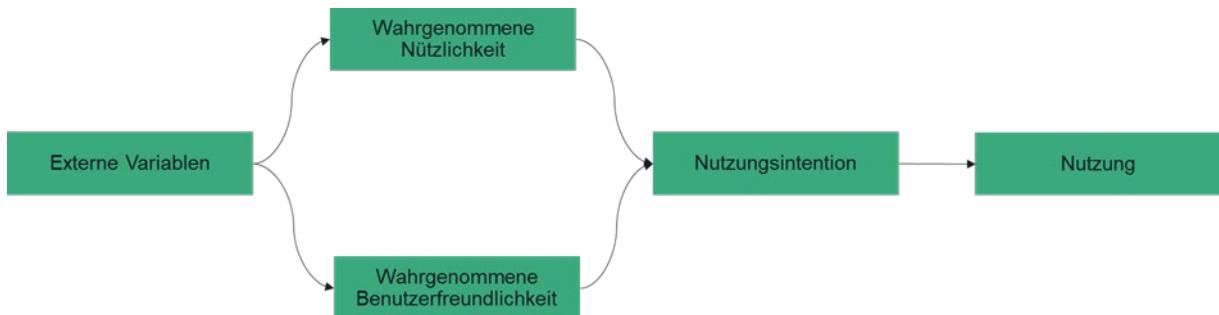


Bild 1: *Technologieakzeptanzmodell nach Fred Davis*

Das TAM wurde von DAVIS (1989) entwickelt und zählt zu den bedeutendsten theoretischen Ansätzen zur Erklärung der Nutzerakzeptanz von Technologien. Ziel war es, ein generalisierbares Modell zu schaffen, das das Verhalten von Endnutzern im Umgang mit neuen Informati onstechnologien vorhersagen kann [DBW89]. Im Zentrum des Modells stehen zwei zentrale Einflussgrößen: der wahrgenommene Nutzen (Perceived Usefulness) und die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (Perceived Ease of Use). Beide wirken auf die Einstellung zur Nutzung, welche wiederum die Nutzungsabsicht (Behavioral Intention) und schließlich das tatsächliche Nutzungsverhalten beeinflusst [DBW89]. TAM ist unbestritten eines der am weitesten verbreiteten Modelle zur Beschreibung und Vorhersage technologischer Nutzung und bildet die theoretische Grundlage für eine Vielzahl empirischer Studien. Zahlreiche Untersuchungen bestätigen seine Robustheit und Anwendbarkeit in unterschiedlichen technologischen Kontexten [VD00], [VMD03], [VB08]. Dennoch wurde das Modell in der Literatur wiederholt kritisiert. Insbesondere hinsichtlich seiner theoretischen Beschränkung und der mangelnden Berücksichtigung sozialer, organisationaler und kontextueller Faktoren wurde Kritik ausgeübt [ANT92]. Als Reaktion auf diese Kritik wurde das Modell in mehreren Stufen weiterentwickelt. VEN-KATESH und DAVIS (2000) führten das sogenannte Technologieakzeptanzmodell 2 (TAM 2) ein, das zusätzliche Einflussgrößen wie subjektive Normen, Image, Ergebnisqualität und wahrgenommene Kontrollierbarkeit integriert. Diese Erweiterung zielte darauf ab, insbesondere die Akzeptanz in organisationalen Kontexten besser zu erklären. Das TAM bildet allgemein bis

heute die Grundlage zahlreicher Weiterentwicklungen und spielt eine zentrale Rolle in der Akzeptanzforschung. Was sich also mit den Modellen verändert hat, sind die verschiedenen Einflussfaktoren für die Akzeptanz.

1.4 Erfolgsfaktoren bei der KI-Einführung

Für neue Technologien, bei diesem Paper mit dem Fokus KI, ist es eben wichtig, genau diese Einflussfaktoren zu kennen, um die Einführung im Unternehmen bestmöglich durchführen zu können. Dabei gibt es bereits einige Vorarbeiten, die verschiedene Einflüsse untersucht haben. Empirische Befunde zeigen, dass neben Nutzen und Usability auch Vertrauen in die Technologie, Transparenz der Algorithmen sowie die Qualität von Schulungsangeboten entscheidend sind [RCR24], [BF22], [FTS+23]. Führungskräfte spielen dabei auch eine zentrale Rolle, indem sie Veränderungen aktiv vorantreiben und den Wandel aktiv begleiten [JAH+23], [ALD23]. Eine Studie zeigte, die ausschließlich die Rolle der Führung als moderierenden Faktor untersuchte, dass lediglich der Zusammenhang zwischen Veränderungswiderstand und KI-Bereitschaft signifikant war, während die Führung selbst keinen direkten Einfluss ausübte [FMS+21]. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass Akzeptanzprozesse für KI nicht eindimensional verlaufen und sich nicht allein über die Führungsebene steuern lassen. Vielmehr ist eine integrierte Be- trachtung nötig, bei der organisatorische Infrastruktur, ethische Governance und begleitende Schulungen gemeinsam wirken, um Mitarbeitende nachhaltig für KI zu gewinnen [KBO24].

In der wissenschaftlichen Diskussion werden wiederholt bestimmte Einflussfaktoren identifiziert, jedoch erfolgt ihre Analyse in zahlreichen Studien isoliert und ohne vergleichende Gewichtung wie z.B. bei FRICK [FMS+21]. Dennoch zeigen sich in der Forschung wiederholt bestimmte Aspekte, die vermehrt auftreten und als **zentrale Erfolgsfaktoren**¹ bei der KI-Einführung gelten können. Diese Erfolgsfaktoren werden im Folgenden näher beschrieben und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die KI-Einführung näher beschrieben. Aus der Literatur geht hervor, dass Einflussfaktoren bei der Einführung von KI künftig nicht nur benannt, sondern auch quantitativ erforscht und gewichtet werden sollten. Die Studie von JÖHNK (2021) listet verschiedene übergeordnete Kategorien mit Einflüssen für die KI-Einführung auf und verweist darauf, dass das Management durch eine quantitative Analyse, etwa mittels multipler linearer Regression, gezielter mit den Einflussfaktoren umgehen kann [JWW21]. Diese vertiefte Analyse bildet die Grundlage, um die folgenden Erfolgsfaktoren genauer zu betrachten und ihre Bedeutung für die KI-Einführung besser einordnen zu können. Auf Basis dieser theoretischen Fundierung werden anschließend Hypothesen abgeleitet, um die empirische Überprüfung ihrer Relevanz und Wirksamkeit zu ermöglichen.

1.4.1 Nutzen und Mehrwert

In der Studie von RAFI aus dem Jahr 2024 zeigte sich, dass der wahrgenommene Nutzen von KI für die Mitarbeitenden die Akzeptanz zur Nutzung maßgeblich steigert [RAF+24]. Darüber

¹ Die aufgeführten zentralen Einflussfaktoren wurden bereits in einer vorangegangenen Interviewstudie qualitativ hergeleitet. Diese Studie basiert auf den Ergebnissen [DHH+25].

hinaus beeinflussen Faktoren der Systemnutzung wie der Nutzen, die individuelle Belastung und die Integration in bestehende Arbeitsabläufe den Erfolg der KI-Einführung im Unternehmen [HPY+24]. Bei KI-Chatbots hat die Leistungserwartung einen positiven Einfluss auf die Verhaltensabsicht, welche wiederum das tatsächliche Nutzungsverhalten fördert [WSC+25]. Schließlich führt die Wahrnehmung, dass KI die Effizienz der Arbeit steigert, nicht nur zu einer Effizienzsteigerung, sondern auch zu einer höheren Bereitschaft zur Nutzung bei den Mitarbeitenden [AC22].

1.4.2 Ausstattung und organisatorische Unterstützung

Sozioorganisatorisch kulturelle Faktoren wie z.B. sozialer Einfluss und die organisatorische Bereitschaft prägen den Erfolg der KI-Einführung im Unternehmen [HPY+24]. Ebenso haben die bestehende Organisationskultur und das Verhalten der Führungskräfte einen entscheidenden Einfluss darauf, wie reibungslos KI-Lösungen implementiert werden [KJ25]. Für die Einführung von KI müssen dementsprechend ausreichend Kapazitäten im Unternehmen zur Verfügung stehen, damit die Veränderung gut gelingen kann. Zu diesen Kapazitäten gehören auch die Planung der finanziellen Kosten für den Einsatz und die Wartung der KI, die als Hindernis beschrieben werden [SLL23].

1.4.3 Wissen und Fähigkeiten

In der durchgeführten Studie von ALSHEHHI zeigen sich große Kompetenzdefizite im Fachwissen sowie eine Überforderung durch KI Tools, die die Umsetzung erschweren und Enttäuschungen verursachen [AK24]. Diese Überforderung wird durch die bereits zitierte Studie verifiziert, bei der nur 17 Prozent der deutschen Unternehmen davon ausgehen, dass die Mitarbeitenden die ausreichenden Kompetenzen haben, um KI zu nutzen [HKM25]. Zudem beeinflussen nutzerbezogene Faktoren wie Vertrauen in das System, Verständnis der Funktionsweise, sowie die Kompetenz in Bezug auf KI sowie technologische Aufgeschlossenheit entscheidend den Erfolg der KI Einführung im Unternehmen [HPY+24].

1.4.4 Vorbereitung auf die Veränderung

Mitarbeiterbeteiligung wirkt sich nachweislich positiv auf die Akzeptanz von KI Lösungen aus [SR24]. Gleichzeitig können Sorgen über Automatisierung und den möglichen Verlust von Fähigkeiten zu Stress, Beschäftigungsunsicherheit und sinkender Arbeitszufriedenheit führen und stellen somit eine zentrale Herausforderung bei der Einführung von KI dar [GGB+24]. Um diesen negativen Effekten entgegenzuwirken, sollten Mitarbeitende ausreichend Zeit erhalten, sich intensiv mit der neuen Technologie auseinanderzusetzen und sich mit ihr vertraut zu machen.

1.4.5 Information und Kommunikation

Eine konsistente und transparente Kommunikation fördert das Verständnis der KI-Implementierung und verringert Widerstände im Unternehmen. Durch klare, durchgängige Informationsflüsse schaffen Führungskräfte Vertrauen und beeinflussen maßgeblich den Erfolg der Einführung von KI-Lösungen [SR24], [KJ25].

1.4.6 Rechtliche und ethische Vertretbarkeit

Der Umgang mit ethischen Fragestellungen sowie Sicherheits- und Datenschutzbedenken stellt eine der größten Herausforderungen bei KI Projekten dar [YTK24]. Hinzu kommt die Undurchsichtigkeit von KI Systemen und Zweifel an der Vertrauenswürdigkeit ihrer Ergebnisse was in einer Studie als eine von sieben zentralen Hürden identifiziert wurde [Bra24]. Wenn sich Mitarbeitende durch den Einsatz von KI bedroht fühlen, wirkt sich dies negativ auf die Akzeptanz und das Gelingen der Einführung aus [HPY+24]. Darüber hinaus erschweren Sicherheits- und Datenschutzbedenken sowie die technologische Komplexität die erfolgreiche Implementierung von KI Lösungen im Unternehmen [SA24].

1.4.7 Vertrauen gegenüber KI

Wahrgenommenes Vertrauen spielt eine zentrale Rolle bei der erfolgreichen Einführung von KI im Unternehmen [YTK24]. Je höher das Vertrauen in die Technologie ist desto eher sind Mitarbeitende bereit sie anzunehmen und aktiv zu nutzen. Vertrautheit und frühere Erfahrungen mit KI Anwendungen stärken dieses Vertrauen und erhöhen die Bereitschaft zur Nutzung deutlich da sie Unsicherheiten abbauen und die Handhabung vertrauter machen [AC22].

1.5 Ableitung der Hypothesen:

Auf Grundlage der zuvor dargestellten Literatur lassen sich sieben relevante Einflussfaktoren, ableiten, die in der wissenschaftlichen Diskussion immer wieder als entscheidend für die erfolgreiche Einführung von KI in Unternehmen genannt werden. Wie bereits erläutert, basieren diese Faktoren auf bewährten theoretischen Modellen sowie empirischen Befunden, die ihre Bedeutung für die Implementierung und Nutzung von KI unterstreichen. Obwohl der Fokus dieser Arbeit auf der erfolgreichen Einführung von KI-Technologien in Organisationen liegt, wird die Nutzungsabsicht der Mitarbeitenden als zentrale abhängige Variable betrachtet. Sie dient als wichtiger Indikator für die Akzeptanz und ermöglicht Rückschlüsse auf die Effektivität der begleitenden Maßnahmen zur Einführung von KI. Die anschließende Hypothesenbildung orientiert sich daher an diesen Einflussfaktoren, um deren Wirkung auf die Nutzungsabsicht im Rahmen dieser Arbeit systematisch zu untersuchen. Daraus ergeben sich folgende Hypothesen:

- 1) Je höher das Verständnis des Ziels der KI-Einführung und der wahrgenommene Mehrwert bewertet wird, desto größer ist die Nutzungsabsicht gegenüber KI.
- 2) Je höher die technische Ausstattung und die organisatorische Unterstützung bewertet wird, desto größer ist die Nutzungsabsicht gegenüber KI.

- 3) Je höher das vorhandene Wissen und die Fähigkeiten zur effektiven Nutzung der KI-Lösungen bewertet werden, desto größer ist die Nutzungsabsicht gegenüber KI.
- 4) Je höher das Gefühl der guten Vorbereitung auf Veränderungen durch KI bewertet wird, desto größer ist die Nutzungsabsicht gegenüber KI.
- 5) Je höher der Informationsstand über den Fortschritt der KI-Einführung und die Kenntnis der AnsprechpartnerInnen bewertet wird, desto größer ist die Nutzungsabsicht gegenüber KI.
- 6) Je höher die Zuverlässigkeit, rechtliche Absicherung und ethische Vertretbarkeit der KI-Lösungen bewertet wird, desto größer ist die Nutzungsabsicht gegenüber KI.
- 7) Je höher das Vertrauen in die KI und das Verständnis ihrer Stärken und Grenzen bewertet wird, desto größer ist die Nutzungsabsicht gegenüber KI.

2 Methodisches Vorgehen zur Bewertung der Einflussfaktoren

Für das vorliegende Paper wurde ein quantitativer Forschungsansatz gewählt, bei dem die Ergebnisse mit Hilfe eines Fragebogens bewertet werden. Im Rahmen des Projekts „Kompetenzzentrum Arbeitswelt.Plus“ fand im Zeitraum von November 2024 bis Januar 2025 eine Umfrage statt, die den Umgang mit KI aus unterschiedlich betrieblichen Perspektiven analysieren sollte. Die Datenerhebung erfolgte mittels Fragebogen, indem verschiedene Konstrukte zum Thema KI-Nutzung erfasst wurden. Eine ähnliche Umfrage hat bereits 2022 stattgefunden [PGT+22]. Der Fragebogen konnte online durchgeführt werden und das Ziel war die Evaluation der KI-Nutzung vor allem in produzierenden Unternehmen. An der Umfrage konnte alle Mitarbeitenden eines Unternehmens teilnehmen, sowie Personaler und das Top-Management.

Zu Beginn des Fragebogens wurde eine Definition von KI aufgenommen, damit alle Teilnehmenden ein einheitliches Verständnis haben: „*Künstliche Intelligenz ist die Eigenschaft eines IT-Systems, "menschenähnliche", intelligente Verhaltensweisen zu zeigen. Das beinhaltet zum Beispiel, eigenständige Schlussfolgerungen zu ziehen, angemessen auf Situationen zu reagieren oder aus Erfahrungen zu lernen.*“ Damit sollte sichergestellt werden, dass jede teilnehmende Person ein Grundverständnis von KI besitzt. Eine weitere Differenzierung, etwa die explizite Erwähnung von generativer KI, erfolgte nicht, sodass die Aussagen allgemein für den Themenbereich KI gelten und nicht spezifisch auf generative KI bezogen sind.

Im ersten Schritt der Auswertung wurden die demografischen Merkmale der Stichprobe betrachtet. Dazu zählten unter anderem, die Stichprobengröße, die Branchenzugehörigkeit sowie der jeweilige Stand der KI-Nutzung in den Unternehmen. Insgesamt nahmen 240 Personen an der Umfrage im Jahr 2025 teil. Die Befragten stammten aus 50 Unternehmen und repräsentierten 19 verschiedene Branchen. Am stärksten vertreten war der Maschinenbau mit einem Anteil von 30 Prozent an den Teilnehmenden. Außerdem gaben 62 Prozent der Befragten an, dass sich ihr Unternehmen in der Einführungs- oder Nutzungsphase von KI befindet, während 23 Prozent der Teilnehmenden in der Diskussion- und Planungsphase befinden. 15 Prozent der Befragten verweisen auf Keine KI-Aktivitäten hin.

Zudem wurden in der Befragung verschiedene Konstrukte abgefragt, um ein besseres Verständnis der Einführung von KI zu gewinnen – darunter auch Aspekte zur Akzeptanz von KI gemäß

dem TAM. Ergänzend wurden sieben zentrale Einflussfaktoren erhoben, die auf Basis einschlägiger Literatur identifiziert wurden. Diese Faktoren wurden jeweils über Single Items erfasst. Sie bilden die unabhängigen Variablen im zugrunde liegenden Modell, das zur Überprüfung der Hypothesen herangezogen wurde. Die abhängige Variable stellt dabei die Nutzungsintention aus dem TAM dar (siehe Bild 2). Da sich das vorliegende Modell gezielt mit der Perspektive der Mitarbeitenden auf die Einführung von KI befasst, wurden für die anschließende Analyse ausschließlich jene Teilnehmenden berücksichtigt, die sich selbst in der Rolle der Mitarbeitenden verstehen – also keine Rollen im Personalwesen oder im Top-Management innehatten. Ein Grund für diese Differenzierung ist der Aufbau der Fragebögen. Das Personalwesen und Top-Management hat unterschiedliche Fragen erhalten, die speziell auf deren Rollen bezogen sind. Damit der Fragebogen nicht zu lang wird und eine höhere Abbruchquote entsteht, wurden aus diesem Grund die Fragen zum TAM nur im Mitarbeitenden Fragebogen aufgeführt. Dadurch reduziert sich die Stichprobengröße für das Modell auf 179 Personen.



Bild 2: Modell der unabhängigen und abhängigen Variable

Für die Überprüfung der Hypothesen wurde ein Regressionsmodell aufgestellt, das die sieben Einflussfaktoren als unabhängige Variablen und die Nutzungsintention als abhängige Variable umfasst. In der zugrunde liegenden Abfrage sollten die Teilnehmenden einschätzen, inwieweit die einzelnen Einflussfaktoren in ihrem Unternehmen bereits erfüllt sind. Die Bewertung erfolgte über eine fünfstufige Likert-Skala von „stimme nicht zu“ bis „stimme zu“. Eine Zustimmung bedeutete, dass der jeweilige Einflussfaktor im Unternehmen aus Sicht der Befragten stark ausgeprägt ist. Diese Frage wurde ausschließlich jenen Mitarbeitenden angezeigt, die täglich KI nutzen. Zudem wurden nur Mitarbeitende und Teamleiter mit in der Auswertung betrachtet, damit diese nahe genug am Tagesgeschäft sind, um die Einführung von KI zu bewerten. Alle anderen wurden ausgeschlossen, da sie die Einführung nicht fundiert bewerten können. Dadurch reduziert sich für die Regressionsanalyse die Stichprobengröße von 179 auf 80. Von den 80 Personen identifizieren sich 30 als Teamleitende und der Rest als Mitarbeitende. Die Stichprobe hat eine Altersdurchschnitt von 35 Jahren mit einer Spannweite von 20 – 61 Jahren. 61 Personen haben einen Hochschulabschluss bzw. eine fertige Promotion.

Zur Überprüfung der Hypothesen wurde eine multiple lineare Regression durchgeführt, die es ermöglicht, den Einfluss mehrerer unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable gleichzeitig zu analysieren und die Stärke einzelner Prädiktoren zu bewerten. Vor der Durchführung wurden alle notwendigen Voraussetzungen geprüft und Ausreißer, sowie Teilnehmende mit fehlenden Wert entfernt. Damit beläuft sich die Regression auf ein $N = 49$.

Ergänzend zum Hypothesentest wurde im Fragebogen eine weitere Abfrage integriert, um festzustellen, welche Einflussfaktoren aus Sicht der Mitarbeitenden für eine erfolgreiche Einführung von KI am wichtigsten sind. In dieser Abfrage sollten die Teilnehmenden drei von sieben Einflussfaktoren auswählen, die sie persönlich als besonders entscheidend empfinden. Für diese zusätzliche Analyse wurden alle 179 Arbeitnehmer zur Teilnahme eingeladen, wobei letztlich 108 von ihnen eine Auswahl trafen. Die Ergebnisse zeigen somit, welche Faktoren von der Mehrheit priorisiert werden – unabhängig davon, ob sie im eigenen Unternehmen bereits stark ausgeprägt sind. Auf Grundlage dieser Top-Drei-Faktoren wurden anschließend konkrete Maßnahmen zur Unterstützung der KI-Einführung vorgeschlagen. Diese Maßnahmen sollten von den Teilnehmenden hinsichtlich ihrer Wichtigkeit bewertet werden. Da jede Person nur Maßnahmen zu ihren drei gewählten Einflussfaktoren bewerten konnte, variieren die Antworthäufigkeiten entsprechend. Die Auswertung der Maßnahmenpriorisierung erfolgte über die Summierung der abgegebenen Bewertungen.

3 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die zentralen Ergebnisse der Studie dargestellt. Zunächst wird aufgezeigt, wie die befragten Mitarbeitenden die Ausprägung der sieben Einflussfaktoren im Unternehmen wahrnehmen (siehe Bild 3). Anschließend werden die Resultate der Regressionsanalyse zur Erklärung der Nutzungsintention in Form einer Tabelle dargestellt. Danach folgt die Auswertung der subjektiven Priorisierung der Einflussfaktoren durch die Teilnehmenden (siehe Bild 4) Abschließend wird die Bewertung konkreter Unterstützungsmaßnahmen zur Förderung einer erfolgreichen KI-Einführung präsentiert (siehe Tabelle 2).

A) Ergebnisse der einzelnen Ausprägungen der verschiedenen Einflussfaktoren

Zunächst wurde erhoben, inwieweit die Mitarbeitenden den einzelnen Einflussfaktoren im eigenen Unternehmen zustimmen. Die folgende Darstellung zeigt die Bewertung der Zustimmung bzw. Ablehnung der Faktoren durch Mittelwerte:

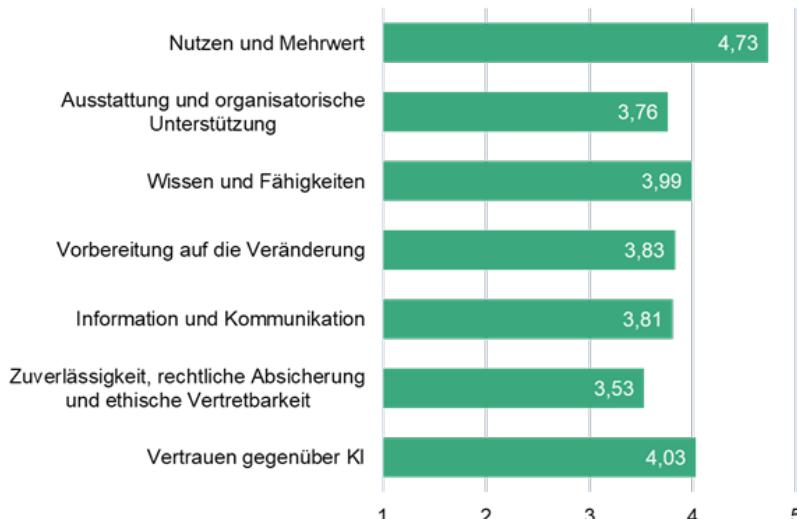


Bild 3: Bewertung der einzelnen Einflussfaktoren (1 = stimme nicht zu; 5 = stimme zu)

B) Ergebnisse der multiplen linearen Regression

Im nächsten Schritt wurde eine multiple lineare Regression durchgeführt, um zu analysieren, welche der sieben Einflussfaktoren signifikant die Nutzungsintention von KI beeinflussen (s. Tabelle 1). Die Tabelle zeigt die unstandardisierten Regressionskoeffizienten, Standardfehler sowie t- und p-Werte:

Tabelle 1: Ergebnisse der linearen Regression

Modell	Unstandardisierte Koeffizienten		t-Wert	p-Wert
	B	Std. Fehler		
(Konstante)	3.004	0.899	3.340	0.002*
Nutzen und Mehrwert	0.260	0.196	1.325	0.193
Ausstattung und organisatorische Unterstützung	-0.035	0.085	-0.414	0.681
Wissen und Fähigkeiten	0.100	0.174	0.575	0.568
Vorbereitung auf die Veränderung	-0.150	0.169	-0.890	0.378
Information und Kommunikation	-0.143	0.085	-1.679	0.101
Zuverlässigkeit, rechtliche Absicherung und ethische Vertretbarkeit	0.223	0.106	2.159	0.037*
Vertrauen gegenüber KI	0.250	0.122	2.042	0.048*

Abhängige Variable: Nutzungsintention von KI

Anmerkungen: N = 49; R² = 0.299; korr. R² = 0.401; F(41); p < 0.05

In der linearen Regression sind zwei unabhängige Variablen signifikant geworden. Damit wurden sowohl die Hypothese 6 als auch die Hypothese 7 bestätigt. Die anderen Hypothesen sind widerlegt worden. Das Modell hat ein R² von 0.401 und somit eine Aufklärung von 40,1%.

C) Ergebnisse Rangfolge der einzelnen Einflussfaktoren

Unabhängig von der statistischen Signifikanz in der Regression wurde in einer ergänzenden Befragung erhoben, welche drei Einflussfaktoren die Mitarbeitenden persönlich als besonders entscheidend für eine erfolgreiche KI-Einführung einschätzen. Die Ergebnisse geben Aufschluss darüber, welche Einflussfaktoren aus subjektiver Sicht der Beschäftigten als besonders relevant empfunden werden. Im Folgenden befindet sich die prozentuale Rangfolge der wichtigsten Einflussfaktoren für die Mitarbeitenden. Dabei wurden von jedem Teilnehmenden drei Einflussfaktoren angekreuzt.



Bild 4: Priorisierung der Einflussfaktoren (Auswahl der drei Wichtigsten)

D) Ergebnisse der favorisierten Maßnahmen

Basierend auf den drei am häufigsten priorisierten Einflussfaktoren wurden den Befragten konkrete Maßnahmenvorschläge zur Auswahl gestellt. Im Folgenden befindet sich die Darstellung der Maßnahmen mit den Häufigkeiten der Nennungen.

Tabelle 2: Maßnahmenkatalog mit Priorisierung der Fragebogenteilnehmer

Maßnahmen zu: Nutzen und Mehrwert (N = 82)	N	N%
Erarbeitung einer klaren Strategie zur Nutzung von KI im Unternehmen	64	78%
Transparente Darstellung des Mehrwerts von KI im Unternehmen	46	56%
Aktive Unterstützung der KI-Einführung durch Führungskräfte	39	48%
Realistische Einschätzung der Auswirkungen von KI auf das Unternehmen durch das Management	31	38%
Einheitliche Definition von KI im Unternehmen	22	27%
Mitarbeiterbefragung zur Erfassung von Meinungen und Erwartungshaltungen gegenüber KI	5	6%
Maßnahmen zu: Wissen und Fähigkeiten (N = 70)	N	N%
Angebot umfangreicher Schulungen zum Verständnis von KI	37	53%
Benennung von mindestens einer Ansprechperson (Key User) pro Abteilung für KI-Fragen	37	53%
Einbindung der Mitarbeitenden in Testphasen von KI-Anwendungen mit Möglichkeit zur Rückmeldung	32	46%
Regelmäßige Statusupdates zur Einführung von KI	30	43%
Förderung des Austauschs der Mitarbeitenden mit (externen) KI-Experten	17	24%
Einrichtung regelmäßiger Feedbackmöglichkeit, auch vor der Einführung von KI	17	24%
Maßnahmen zu: Vertrauen gegenüber KI (N = 56)	N	N%
Frühzeitige Erklärung der möglichen Veränderungen des Arbeitsplatzes durch KI	36	64%
Angebot umfangreicher Schulungen zum Verständnis von KI	36	64%
Einbindung der Mitarbeitenden in Testphasen von KI-Anwendungen mit Möglichkeit zur Rückmeldung	30	54%
Einrichtung regelmäßiger Feedbackmöglichkeit, auch vor der Einführung von KI	21	38%
Mitarbeiterbefragung zur Erfassung von Meinungen und Erwartungshaltungen gegenüber KI	12	21%
Prüfung der KI-Umsetzung durch den Betriebsrat	10	18%
Maßnahmen zu: Zuverlässigkeit, Recht und Ethik (N = 41)	N	N%
Festlegung klarer Regeln für den Umgang und Einsatz von KI	32	78%
Vermittlung von Kenntnissen zur Erkennung von KI-Fehlern in Schulungen	28	68%
Kommunikation zum Umgang mit dem Thema Datenschutz	26	63%
Ausreichende Analyse der Auswirkungen auf das Unternehmen	14	34%
Festlegung klarer Regeln zur Verantwortlichkeit bei Fehlern	8	20%
Prüfung der KI-Umsetzung durch den Betriebsrat	6	15%

Maßnahmen zu: Organisatorische Unterstützung KI (N = 36)	N	N%
Klärung der Datenquellen für die Nutzung von KI	23	64%
Festlegung klarer Regeln für den Umgang und Einsatz von KI	22	61%
Planung ausreichender Mitarbeiterkapazitäten für die KI-Einführung	20	56%
Einheitliche Definition von KI im Unternehmen	10	28%
Mitarbeiterbefragung zur Erfassung von Meinungen und Erwartungshaltungen gegenüber KI	4	11%
Prüfung der KI-Umsetzung durch den Betriebsrat	2	6%
Maßnahmen zu: Information und Kommunikation (N = 17)	N	N%
Gewährleistung der Möglichkeit für Mitarbeitende, jederzeit Bedenken zu äußern	10	59%
Benennung von mindestens einer Ansprechperson (Key User) pro Abteilung für KI-Fragen	9	53%
Regelmäßige Statusupdates zur Einführung von KI	9	53%
Einbindung der Mitarbeitenden in Testphasen von KI-Anwendungen mit Möglichkeit zur Rückmeldung	8	47%
Förderung des Austauschs der Mitarbeitenden mit (externen) KI-Experten	3	18%
Mitarbeiterbefragung zur Erfassung von Meinungen und Erwartungshaltungen gegenüber KI	2	12%
Maßnahmen zu: Vorbereitung auf die Veränderung (N = 17)	N	N%
Einbindung der Mitarbeitenden in Testphasen von KI-Anwendungen mit Möglichkeit zur Rückmeldung	8	47%
Gewährleistung der Möglichkeit für Mitarbeitende, jederzeit Bedenken zu äußern	8	47%
Frühzeitige Erklärung der möglichen Veränderungen des Arbeitsplatzes durch KI	8	47%
Planung ausreichender Zeit für Veränderungsprozesse ohne Übereilung	6	35%
Einrichtung regelmäßiger Feedbackmöglichkeit, auch vor der Einführung von KI.	4	24%
Mitarbeiterbefragung zur Erfassung von Meinungen und Erwartungshaltungen gegenüber KI	2	12%

4 Diskussion

In der Diskussion werden die Erkenntnisse aus der Forschung eingeordnet und Handlungsempfehlungen für Unternehmen abgeleitet. Dabei gibt es fünf verschiedene Auswertungsdimensionen, die im folgenden betrachtet werden:

- A) Diskussion der einzelnen Ausprägungen der verschiedenen Einflussfaktoren
- B) Diskussion über die Ergebnisse der multiplen linearen Regression
- C) Diskussion Rangfolge der einzelnen Einflussfaktoren
- D) Diskussion der favorisierten Maßnahmen
- E) Allgemeine Zusammenfassung der gefundenen Ergebnisse

A) Diskussion der einzelnen Ausprägungen der verschiedenen Einflussfaktoren

Auffällig ist, dass alle Mittelwerte der Einflussfaktoren auf einer fünfstufigen Likertskala mindestens bei einem Wert von drei liegen, insbesondere „Mehrwert“ und „Vertrauen“ sogar über vier (siehe Bild 3). Dies deutet auf eine insgesamt positive Einschätzung der Ausgangslage der Unternehmen seitens der Mitarbeitenden hin, sodass z.B. der Mehrwert von KI für die Mitarbeitenden klar und Vertrauen in KI vorhanden ist. Eine mögliche Erklärung hierfür ist der Kontext des Projekts „Arbeitswelt.Plus“, an dem viele der befragten Unternehmen aktiv teilnehmen.

Die projektbezogene Unterstützung durch Schulungen und wissenschaftliche Experten verbessert vermutlich nicht nur die praktische Umsetzung von KI, sondern auch die subjektive Wahrnehmung der Mitarbeitenden. Die hohe Ausprägung der Einflussfaktoren dürfte somit zumindest teilweise auf den besonderen Förderkontext des Projekts zurückzuführen sein und könnte in einem anderen Umfeld niedriger ausfallen.

B) Diskussion über die Ergebnisse der linearen Regression

Aus den Ergebnissen lässt sich festhalten, dass zwei Hypothesen signifikant sind und auch das Gesamtmodell der linearen Regression einen statistisch nachweisbaren Zusammenhang liefert. Damit lassen sich zentrale Einflussfaktoren auf die Nutzungsintention von KI ableiten.

Das Modell erreicht ein Bestimmtheitsmass R^2 von über 0.40, was bedeutet, dass mehr als 40 Prozent der Varianz der Akzeptanzabsicht erklärt werden. Das spricht für eine hohe praktische Relevanz: Für Mitarbeitende ist es bei der Einführung von KI vor allem Zuverlässigkeit, rechtliche und ethische Vertretbarkeit, sowie das Vertrauen in KI entscheidend. Werden diese Einflussfaktoren adressiert, steigt die Nutzungsabsicht deutlich an und Herausforderungen, wie die Angst vor KI können gesenkt werden.

Interessanterweise zeigen Faktoren wie Strategie und Mehrwert, fachliche Kompetenz, vorhandenes Wissen, organisatorische Vorbereitung und persönliche Vorbereitung im ersten Schritt keinen signifikanten Einfluss auf die Nutzungsabsicht. Diese Befunde weichen von bisherigen Erkenntnissen ab. Ein möglicher Grund liegt in der Komplexität der Einführung von künstlicher Intelligenz, da sich in dieser Stichprobe viele Teilnehmende noch in der Pilotphase befanden. Sie erleben aktuell ihre ersten Berührungspunkte mit der Technologie. In dieser Anfangsphase stehen Fragen nach der Zuverlässigkeit und dem Vertrauensaufbau im Vordergrund. Organisatorische Aspekte und z.B. der Ausbau von Kompetenzen gewinnen vermutlich erst in späteren Implementierungsphasen an Bedeutung.

Von allen getesteten Einflussfaktoren sind die Fälle signifikant geworden, in denen es um persönliche Meinungen geht. Beispielsweise, ob eigenes Vertrauen in die KI vorhanden ist und ob die Veränderung ethisch vertretbar ist. Diese Entscheidungen werden sehr individuell getroffen und können stark variieren. Die Studie zeigt daher den Einfluss solcher persönlichen Überzeugungen und dass diese bei einer Einführung von KI betrachtet werden müssen.

C) Diskussion der Rangfolge der einzelnen Einflussfaktoren

Die Priorisierung der Einflussfaktoren bestätigt die Hypothesen nur teilweise: Der wahrgenommene Mehrwert von KI steht klar an erster Stelle, gefolgt von Wissen und Fähigkeiten der Mitarbeitenden und erst danach dem Vertrauen in die Technologie. Auffällig ist, dass Mitarbeitende dem Kompetenzaspekt eine hohe Bedeutung zuschreiben, obwohl die Regression keinen signifikanten Einfluss auf die Nutzungsabsicht ergab. Wie bereits in Abschnitt A dargestellt, legt das Projekt „Arbeitswelt.Plus“ einen starken Fokus auf den Transfer von Kompetenzen. Mitarbeitende erleben dadurch, wie wichtig diese Themen im Rahmen der Einführung von KI sind. Dies dürfte erklären, warum Wissen und Fähigkeiten im Ranking so weit oben stehen.

D) Diskussion der favorisierten Maßnahmen

Unternehmen sollten vor einer KI-Einführung eine Strategie mit Maßnahmenplan erstellen. Aus den Ergebnissen des Fragebogens sind für die Mitarbeitenden dabei folgende Punkte zentral:

- **Klare Strategie für Ziele und Verantwortlichkeiten festlegen:** Eine gut definierte Strategie schafft Orientierung und gewährleistet, dass alle Beteiligten wissen, an welchen Zielen sie arbeiten und wer für welche Schritte zuständig ist.
- **Gezielte Schulungsangebote bereitstellen:** Durch praxisnahe Trainings erwerben Mitarbeitende die nötigen Kompetenzen im Umgang mit KI und bauen Unsicherheiten ab. Schulungen helfen, Hemmungen abzubauen und fördern eine positive Haltung.
- **Transparente Kommunikation zur Auswirkung von KI auf den Arbeitsalltag:** Erklärungen dazu, wie sich KI Anwendungen konkret auf einzelne Arbeitsaufgaben auswirken, schaffen Vertrauen. Transparenz zeigt den Nutzen auf und verhindert, dass Mitarbeitende sich abgehängt oder verunsichert fühlen.
- **Feste Ansprechpersonen in den Abteilungen etablieren:** Ein direkter Ansprechpartner ermöglicht schnelle Hilfestellung bei Fragen oder Problemen. So fühlen sich Mitarbeitende begleitet und bleiben motiviert, KI Anwendungen aktiv zu nutzen.

E) Allgemeine Zusammenfassung der gefundenen Ergebnisse

Insgesamt zeigt die Studie, wie wichtig eine sorgfältige Planung bei der Einführung von KI in Unternehmen ist. Denn nur mit einer erfolgreichen Einführung können die Vorteile einer KI genutzt werden. Dafür ist es wichtig, dass Verantwortliche die zentralen Einflussfaktoren kennen, um die Mitarbeitenden von Anfang an abzuholen und den Nutzen der Technologie deutlich zu machen. Nur so lässt sich die Nutzungsabsicht steigern und eine KI reibungslos aus der Mitarbeiterperspektive einführen. Damit kann auch das ursprüngliche Ziel, der Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit erfüllt werden.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse empfiehlt sich ein Leitfaden (siehe Bild 5), der bereits in der frühen Phase der Projekte ansetzt.

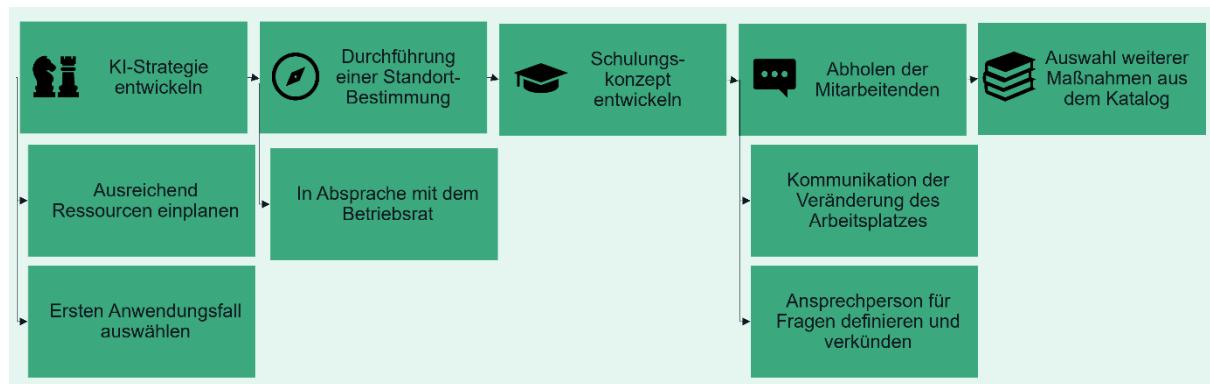


Bild 5: Handlungsleitfaden für die Einführung von KI im Unternehmen

Zuerst sollten Unternehmen eine klare Strategie entwickeln und festlegen, welche Ziele mit KI erreicht werden sollen und in welche Richtung sich das Unternehmen entwickeln möchte. Dabei ist es entscheidend, die erforderlichen personellen und finanziellen Ressourcen zu planen, damit es nicht zu Engpässen während der Einführung kommt. Danach empfiehlt es sich, einen ersten

Anwendungsfall auszuwählen, bei dem der Mehrwert für die Mitarbeitenden sofort erkennbar ist und der so zur Steigerung der Akzeptanz beiträgt. Anschließend gilt es, den aktuellen Stand der Mitarbeitenden zu ermitteln, etwa durch Fragebögen, Workshops oder individuelle Gespräche, um Kompetenzlücken und mögliche Ängste frühzeitig aufzuspüren und das Vertrauen sowohl in die Technologie als auch in die verantwortungsvolle Umsetzung im Unternehmen. Wichtig ist eine Absprache beispielsweise mit dem Betriebsrat, um ggf. den Umgang mit ethischen Konflikten frühzeitig zu besprechen. Parallel dazu sollten Unternehmen transparent kommunizieren, wie sich Arbeitsprozesse durch KI verändern, und ein praxisnahes Schulungskonzept entwickeln, das die Mitarbeitenden gezielt befähigt. Schließlich ist es wichtig, in jeder Abteilung feste Ansprechpartner zu benennen, die bei Fragen oder Unsicherheiten unmittelbar unterstützen. Im Anschluss können sich Unternehmen an den, im Ergebnisteil, aufgeführten Maßnahmen inspirieren und ihre passenden Bausteine umsetzen.

Obgleich diese Schritte idealerweise nacheinander durchgeführt werden, kann die Reihenfolge je nach Unternehmenskontext variieren und einzelne Schritte können parallel laufen. Entscheidend ist, dass alle genannten Aspekte zum Start der Einführung berücksichtigt werden.

5 Limitation und zukünftige Forschung

Die Ergebnisse der Studie sind unter Berücksichtigung einiger methodischer Einschränkungen zu interpretieren und bieten Anlass für weitere Forschungen.

Aufgrund dem Ausschluss von Mitarbeitenden (durch keine Nutzung von KI) ist die Stichprobe relativ klein ausgefallen, wodurch die Übertragbarkeit der Erkenntnisse eingeschränkt sein könnte. Zudem war die Umfrage öffentlich zugänglich, was möglicherweise eine Teilnahmeverzerrung begünstigte, da insbesondere Unternehmen motiviert waren teilzunehmen, die bereits positive Erfahrungen mit KI gesammelt hatten. Die erfassten Einflussfaktoren wurden zudem relativ abstrakt gehalten, sodass zukünftige Studien diese spezifischer operationalisieren sollten, um detailliertere und praxisnahe Erkenntnisse zu ermöglichen. Besonders die Ausprägung der einzelnen Items der Einflussfaktoren sollten mit einer unabhängigen Stichprobe wiederholt werden, um allgemeingültige Aussagen treffen zu können.

Zukünftige Untersuchungen könnten aufbauend auf den Ergebnissen zudem den zeitlichen Verlauf der KI-Einführung genauer betrachten. Insbesondere wäre es interessant zu überprüfen, ob die Kompetenzaspekte, denen aktuell hohe Bedeutung beigemessen wird, im Verlauf der KI-Implementierung weiterhin so stark wahrgenommen werden. Zudem könnte über den Zeitverlauf auch der Faktor „Angst“ im Bezug auf mögliche Arbeitsverluste thematisiert werden, dieser in dem Paper außenvorgelassen worden ist. Weiterhin bietet sich an, die konkreten Maßnahmen klarer voneinander abzugrenzen, um deren Wirkung präziser bewerten zu können. Zudem könnten beispielsweise die Sichtweisen von Führungskräften gegenüber Mitarbeitenden näher analysiert werden, um mögliche Differenzierungen feststellen zu können.

Trotz dieser genannten Limitationen bietet die vorliegende Studie einen relevanten Ausgangspunkt für vertiefende Forschungsarbeiten und liefert bereits wertvolle Hinweise auf die zentralen Faktoren, die bei der Einführung von KI eine Rolle spielen.

6 Fazit

Die Einführung von künstlicher Intelligenz gewinnt in Unternehmen zunehmend an Bedeutung, da sie erhebliche Potenziale zur Produktivitätssteigerung und Förderung von Innovation bietet. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, sind Unternehmen auf diese Technologien angewiesen. Allerdings ist der Einführungsprozess nicht trivial: Entscheidend für eine erfolgreiche Nutzung von KI ist, dass Mitarbeitende frühzeitig einbezogen werden und die Technologie akzeptieren.

Die vorliegende Studie zeigt, dass insbesondere die ersten Schritte einer KI-Einführung kritisch sind. Zentral ist es, den Mehrwert der KI durch konkrete Anwendungsfälle klar zu kommunizieren und Vertrauen in die Technologie aufzubauen. Im Unternehmen sollte sichergestellt werden, dass der rechtliche Rahmen passt und durch die Nutzung bzw. Einführung einer KI keine ethischen Konflikte entstehen. Zudem legen Mitarbeitende großen Wert auf Möglichkeiten zum gezielten Kompetenzaufbau, um vorhandene Widerstände gegenüber KI abzubauen.

Zusammenfassend wird empfohlen, dass Unternehmen langfristige und individuelle Strategien für den Umgang mit KI entwickeln. Nur wenn Organisationen unterschiedliche Szenarien berücksichtigen und ihre Roadmap an eigene Strukturen und Ziele anpassen, können sie das Potenzial von KI voll ausschöpfen und ihre Zukunftsfähigkeit sicherstellen.

Anmerkung: Zur Verbesserung der sprachlichen Aufarbeitung wurde Künstliche Intelligenz benutzt. Alle Angaben wurden von den Autoren geprüft.

Förderhinweis

Dieser Beitrag ist im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ geförderten und durch den Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreuten Kompetenzzentrum Arbeitswelt.Plus (FKZ: 02L19C107) entstanden. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [AC22] AHN, M. J.; CHEN, Y.-C.: Digital transformation toward AI-augmented public administration: The perception of government employees and the willingness to use AI in government. *Government Information Quarterly*, (39)2, 2022, S. 101664
- [AK24] ALSHEHHI, E. T.; KHADEM, M.: Investigating the AI Drivers Integrating in Healthcare Systems: 2024 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD). 2024 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD), 04.11.2024 - 06.11.2024, Sharjah, United Arab Emirates, IEEE, 2024, S. 1–6
- [AKA25] ALHUSBAN, M. I.; KHATATBEH, I. N.; ALSHURAFAT, H.: Exploring the influence, implications and challenges of integrating generative artificial intelligence into organizational learning and development. *Competitiveness Review: An International Business Journal*, 2025
- [AID23] ALDHAEN, E.: Education skills for digital age toward sustainable development – analysis and future directions. *Development and Learning in Organizations: An International Journal*, (37)3, 2023, S. 11–14
- [ANT92] ADAMS, D. A.; NELSON, R. R.; TODD, P. A.: Perceived Usefulness, Ease of Use, and Usage of Information Technology: A Replication. *MIS Quarterly*, (16)2, 1992, S. 227

[BC15] BHAWSAR, P.; CHATTOPADHYAY, U.: Competitiveness: Review, Reflections and Directions. *Global Business Review*, (16)4, 2015, S. 665–679

[BF22] BEDUÉ, P.; FRITZSCHE, A.: Can we trust AI? An empirical investigation of trust requirements and guide to successful AI adoption. *Journal of Enterprise Information Management*, (35)2, 2022, S. 530–549

[BHI+25] BHUIYAN, M. R. I.; HUSAIN, T.; ISLAM, S.; AMIN, A.: Exploring the prospective influence of artificial intelligence on the health sector in Bangladesh: a study on awareness, perception and adoption. *Health Education*, (125)3, 2025, S. 279–297

[Bra24] BRANDTNER, P.: Digital Transformation of Supply Chain Management - Challenges and Strategies for Successfully Implementing Data Analytics in Practice: Proceedings of the 2024 8th International Conference on E-Commerce, E-Business, and E-Government. ICEEG 2024: 2024 the 8th International Conference on E-Commerce, E-Business, and E-Government, 28 05 2024 30 05 2024, Ajman United Arab Emirates, ACM, New York, NY, USA, 2024, S. 36–42

[Cla17] CLAUSS, T.: Measuring business model innovation: conceptualization, scale development, and proof of performance. *R&D Management*, (47)3, 2017, S. 385–403

[Dav89] DAVIS, F. D.: Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, (13)3, 1989, S. 319

[DBW89] DAVIS, F. D.; BAGOZZI, R. P.; WARSHAW, P. R.: User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models. *Management Science*, (35)8, 1989, S. 982–1003

[DHH+25] DONDORF, V.; HAPPE, L.; HOBSCHEIDT, D.; KÜRPICK, C.; DUMITRESCU, R.: Evaluation Of The Challenges In Implementing AI Across The Different Phases - Empirical Insights Derived From AI Implementation Projects In Industry. Hannover publish-Ing, 2025

[DWN23] DAUGHERTY, P. R.; WILSON, H. J.; NARAIN, K.: Generative AI Will Enhance — Not Erase — Customer Service Jobs, 16. Juni 2025

[FMS+21] FRICK, N. R. J.; MIRBABAIE, M.; STIEGLITZ, S.; SALOMON, J.: Maneuvering through the stormy seas of digital transformation: the impact of empowering leadership on the AI readiness of enterprises. *Journal of Decision Systems*, (30)2-3, 2021, S. 235–258

[FRS+24] FRIETSCH, R.; RAMMER, C.; SCHUBERT, T.; CHAVEZ, C. G.; GRUBER, S.; MARUSEVA, V.; WALZ, R.: Innovationsindikator 2024. Unter: <https://innovationsindikator.bdi.eu/>, 16. Juni 2025

[FTS+23] FAUZI, F.; TUHUTERU, L.; SAMPE, F.; AUSAT, A. M. A.; HATTA, H. R.: Analysing the Role of ChatGPT in Improving Student Productivity in Higher Education. *Journal on Education*, (5)4, 2023, S. 14886–14891

[GGB+24] GUPTA, N.; GAUR, V.; BHATT, A.; GAUR, S.; SRIVASTAVA, N.: Intelligent Techniques for Managing Employee Performance: Addressing Psychosocial Challenges: 2024 International Conference on Intelligent & Innovative Practices in Engineering & Management (IIPEM). 2024 International Conference on Intelligent & Innovative Practices in Engineering & Management (IIPEM), 25.11.2024 - 25.11.2024, Singapore, Singapore, IEEE, 2024, S. 1–6

[HKM25] HÖCK, B.; KLEIN, L. DR.; MADAN, A.: GENERATIVE KI in der deutschen Wirtschaft 2025 – Wo stehen deutsche Unternehmen bei der Implementierung generativer KI? Unter: <https://kpmg.com/de/de/home/themen/2025/04/studie-generative-ki-in-der-deutschen-wirtschaft-2025.html>

[HPY+24] HUA, D.; PETRINA, N.; YOUNG, N.; CHO, J.-G.; POON, S. K.: Understanding the factors influencing acceptability of AI in medical imaging domains among healthcare professionals: A scoping review. *Artificial intelligence in medicine*, (147), 2024, S. 102698

[JAH+23] JANAH, Y. M.; ALDHAEN, E.; HAMDAN, A.; NURELDEEN, W. A.: Emerging technologies for digitalized learning in higher education. *Development and Learning in Organizations: An International Journal*, (37)6, 2023, S. 29–31

[KBO24] KIM, Y.; BLAZQUEZ, V.; OH, T.: Determinants of Generative AI System Adoption and Usage Behavior in Korean Companies: Applying the UTAUT Model. *Behavioral sciences* (Basel, Switzerland), (14)11, 2024

[KJ25] KELM, K.; JOHANN, M.: Artificial intelligence in corporate communications: determinants of acceptance and transformative processes. *Corporate Communications: An International Journal*, (30)1, 2025, S. 124–138

[Kla24] KLAUTH, J.: Die Welt wird immer leistungsfähiger – und Deutschland fällt zurück. Unter: <https://www.welt.de/wirtschaft/article251716650/Deutschland-faellt-zurueck-und-die-Welt-wird-immer-leistungsfähiger.html>, 16. Juni 2025

[MFP+24] MASLEJ, N.; FATTORINI, L.; PERRAULT, R.; PARLI, V.; REUEL, A.; BRYNJOLFSSON, E.; ETCHEMENDY, J.; LIGETT, K.; LYONS, T.; MANYIKA, J.; NIEBLES, J. C.; SHOHAM, Y.; WALD, R.; CLARK, J.: Artificial Intelligence Index Report 2024. arXiv, 2024

[MSM+24] MANRESA, A.; SAMMOUR, A.; MAS-MACHUCA, M.; CHEN, W.; BOTCHIE, D.: Humanizing GenAI at work: bridging the gap between technological innovation and employee engagement. *Journal of Managerial Psychology*, 2024

[PGT+22] PAPENKORDT, J.; GABRIEL, S.; THOMMES, K.; DUMITRESCU, R.: Künstliche Intelligenz in der industriellen Arbeitswelt. Kompetenzzentrum Arbeitswelt.Plus, 2022

[RAF+24] RAFI, M.; AITKEN, J. M.; FATAH, T. D.; MAILANGKAY, A.: Analyzing The Impact of Generative AI on IT Employee Performance: 2024 3rd International Conference on Creative Communication and Innovative Technology (ICCIT). 2024 3rd International Conference on Creative Communication and Innovative Technology (ICCIT), 07.08.2024 - 08.08.2024, Tangerang, Indonesia, IEEE, 2024, S. 1–7

[RBP+22] ROSA, A.; BENTO, T.; PEREIRA, L.; D. R. L.; COSTA, A.; DIAS, Á.; GONÇALVES, R.: Gaining competitive advantage through artificial intelligence adoption. *International Journal of Electronic Business*, (17)4, 2022, S. 386

[RCR24] RANE, N.; CHOUDHARY, S.; RANE, J.: Acceptance of artificial intelligence: key factors, challenges, and implementation strategies. *SSRN Electronic Journal*, 2024

[SA24] SIRADHANA, N. K.; ARORA, R. G.: Examining the Influence of Artificial Intelligence Implementation in HRM Practices Using T-O-E Model. *Vision: The Journal of Business Perspective*, 2024

[SC25] STREIM, A.; CZACHOWSKI, L.: KI-Nutzung boomt – aber die Angst vor Abhängigkeit vom Ausland ist groß. Unter: https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/KI-Nutzung-boomt-Angst-vor-Abhängigkeit-Ausland-gross#_

[SLL23] SHANG, G.; LOW, S. P.; LIM, X. Y. V.: Prospects, drivers of and barriers to artificial intelligence adoption in project management. *Built Environment Project and Asset Management*, (13)5, 2023, S. 629–645

[SR24] SHARMA, R.; REDDY, B.: Strategic Approaches to AI Integration in Organizations: Managing Change and Maximizing Benefits: 2024 4th Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON). 2024 4th Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON), 23.08.2024 - 25.08.2024, Pimari Chinchwad, India, IEEE, 2024, S. 1–5

[VB08] VENKATESH, V.; BALA, H.: Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions. *Decision Sciences*, (39)2, 2008, S. 273–315

[VD00] VENKATESH, V.; DAVIS, F. D.: A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. *Management Science*, (46)2, 2000, S. 186–204

[VMD03] VENKATESH; MORRIS; DAVIS: User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, (27)3, 2003, S. 425

[WSC+25] WIJAYA, T. T.; SU, M.; CAO, Y.; WEINHANDL, R.; HOUGHTON, T.: Examining Chinese preservice mathematics teachers' adoption of AI chatbots for learning: Unpacking perspectives through the UTAUT2 model. *Education and Information Technologies*, (30)2, 2025, S. 1387–1415

[YTK24] YUN, C. H.; TEOH, A. P.; KHAW, T. Y.: Artificial Intelligence Integration in e-Government: Insights from the Korean Case: 2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA). 2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA), 27.02.2024 - 29.02.2024, Changchun, China, IEEE, 2024, S. 1159–1164

Autoren

Verena Dondorf studierte Wirtschaftspsychologie in Bielefeld. Anschließend arbeitete sie mehrere Jahre als Teamleiterin in einem Logistikunternehmen und ist derzeit wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer IEM mit den Schwerpunkten Change Management und digitale Transformation.

Kitrujan Kokilanathan studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Technischen Universität Berlin. Er ist als wissenschaftliche Mitarbeiter im Bereich Advanced Systems Engineering in der Abteilung Strategie- und Transformationsmanagement tätig.

Jannis Graunke studierte dual Maschinenbau und Digitale Technologien in Soest und verlängerte bei dem Sondermaschinenbauer zunächst, bevor der Wechsel 2023 zum Fraunhofer IEM anstand. Seither ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter mit dem Schwerpunkt Systems Engineering in verschiedenen Forschungs- und Industrieprojekte aktiv.

Daniela Hobscheidt studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit dem Schwerpunkt Maschinenbau an der Universität Paderborn. Derzeit leitet sie die Gruppe Strategie und Transformationsmanagement am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik und Mechatronik. Dort leitet sie Forschungs- und Industrieprojekte in den Bereichen New Work, Smart Factory, Digitalisierung und Nachhaltigkeitsstrategie.

Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu ist Direktor am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM und Leiter der Fachgruppe Advanced Systems Engineering am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Produktentstehung intelligenter technischer Systeme. In Personalunion ist Prof. Dumitrescu Geschäftsführer des Technologienetzwerks Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe (it's OWL).

Einsatz von Künstlicher Intelligenz bei der Entwicklung von Zukunftsszenarien am Beispiel der Haushaltsgerätebranche

**Lukas Steiert¹, Liza Wohlfart², Benjamin Schneider², Stephan Schüle²,
Katharina Hözle^{1,2}**

¹ Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart,
lukas.steiert@iat.uni-stuttgart.de

² Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
liza.wohlfart@iao.fraunhofer.de, benjamin.schneider@iao.fraunhofer.de,
stephan.schuele@iao.fraunhofer.de, katharina.hölzle@iao.fraunhofer.de

Zusammenfassung

Zukunftsszenarien sind eine wichtige Methode der strategischen Vorausschau. Erfolgreiche Szenario-Projekte basieren in der Regel auf einem strukturierten, daten- und methodengestützten Vorgehen, das Expertenwissen sinnvoll interpretiert. Die Erstellung benötigt umfangreiche Recherchen und spezielle IT-Tools. Künstliche Intelligenz (KI) bietet Ansatzpunkte, um diesen Prozess effizienter zu gestalten und die Qualität der Szenarien zu verbessern. Interessant dabei ist vor allem die Fähigkeit von KI, große Datenmengen zügig auszuwerten und zu konsolidieren, verschiedene Perspektiven einzubinden und Impulse für kreative Arbeitsschritte zu liefern. Gleichzeitig müssen typische Herausforderungen von KI im Blick behalten werden, wie die Gefahr des sogenannten Halluzinierens sowie eines möglichen Bias. Dieser Beitrag beleuchtet wie gut heutige KI-Werkzeuge die Szenario-Entwicklung unterstützen können, wo die größten Mehrwerte zum konventionellen Vorgehen entstehen und welche Herausforderungen beachtet werden müssen. Betrachtet wird eine KI-gestützte Szenario-Entwicklung für den Bereich Haushaltsgeräte indem verschiedene KI-Tools getestet werden. Am sinnvollsten erscheint der Einsatz von KI-Werkzeuge bei der Identifizierung von Einflussfaktoren, der Recherche (Erhebung relevanter Daten, Fakten und Trends), dem Aufbau von Zukunftsprojektionen und der Ausgestaltung der Szenarien zur strategischen Kommunikation. Der gesamte Szenarioprozess wird beispielhaft mit FhGenie, dem KI-Tool der Fraunhofer-Gesellschaft durchgeführt. Dieses enthält verschiedene ChatGPT Modelle und Dalle-E als Bildgenerator. Mit dem entstandenen Vorgehen wurden drei Szenarien entwickelt: „Grüner Lebensstil“, „wirtschaftliche Resilienz“ und „Rückkehr zur Einfachheit“. Der Beitrag zeigt, wie der Aufwand zur Szenario-Entwicklung durch KI-Werkzeuge reduziert werden kann. Die durch den KI-Einsatz entstandenen Vorteile und Herausforderungen werden detailliert beschrieben.

Schlüsselworte

Szenariomanagement, Zukunftsszenarien, Szenariotechnik, Künstliche Intelligenz, Advanced Systems Engineering, Haushaltsgeräte

Use of artificial intelligence in the development of future scenarios using the example of the household appliance industry

Abstract

Future scenarios are an important method for strategic foresight. Successful scenario projects in general are based on a structured, data- and method-supported approach that interprets expert knowledge in a meaningful way. Creating scenarios requires extensive research and special IT tools. Artificial intelligence (AI) offers opportunities to make this process more efficient and improve the quality of the scenarios. Of particular interest is the ability of AI to quickly evaluate and consolidate large amounts of data, integrate different perspectives and provide ideas for creative work steps. At the same time, typical challenges of AI must be kept in mind, such as the risk of hallucination and biases. This publication investigates the potential of today's AI tools to support scenario development, highlighting opportunities for added value compared to the conventional approaches and flagging challenges to be considered. An AI-supported scenario development for the area of household appliances is conducted by testing several AI tools. Suitable steps in the process appear to be the identification of influencing factors, research activities (collection of relevant data, facts and trends), the development of future assumptions and the preparation of scenarios for strategic communication. The entire scenario process is carried out using FhGenie, an AI tool developed by the Fraunhofer-Gesellschaft. This tool offers various ChatGPT models and Dalle-E as an image generator. Three scenarios emerged in the authors' pilot trial: "Green lifestyle", "Economic resilience" and "Return to simplicity". This paper shows how AI tools can reduce the effort required to develop scenarios and details advantages and challenges resulting from the use of AI.

Keywords

Scenario Management, Future Scenarios, Scenario Method, Artificial Intelligence, Advanced Systems Engineering, Household Appliances

1 Einleitung

Angesichts aktueller wirtschaftlicher, politischer und gesellschaftlicher Veränderungen stehen Entscheidungsträger aus Unternehmen und Politik einer Vielzahl an Herausforderungen und Unsicherheiten gegenüber. Sie müssen schnell auf aktuelle Dynamiken reagieren, und gleichzeitig klare, langfristige Ziele konsequent im Blick behalten. Auch wenn dynamische Situationen zu kurzfristigen Entscheidungen verleiten können, führt eine langfristige Planung, gestützt mit systematischen Methoden, zu einem größeren Erfolg für Unternehmen [KD22, S. 121f.]. Die durch Eigenschaften wie Vernetzung und Autonomie steigende Komplexität von Systemen und die zunehmende Verflechtung von Märkten und Marktteilnehmern erzeugt zusätzliche Herausforderungen [RKS23, S. 2f.]. Künstliche Intelligenz (KI), eingesetzt im Produktentstehungsprozess, verspricht eine erleichterte Handhabung komplexer Systeme und großer Datenmengen [RKS23, S. 4]. KI findet bei Endkonsumenten bereits eine breite Anwendung, z.B. beim Online-Shopping oder beim Streamen von Musik [MHW20, S. 8]. In der Industrie besitzt sie das Potenzial, entlang der gesamten Wertschöpfungskette Vorteile zu bringen [MHW20, S. 20]. In einer Studie von Stowasser et al. 2024 gab die Mehrheit der Befragten aus produzierenden Unternehmen an, dass sie bereits KI-Lösungen implementiert hätten oder dies planten [SJH24, S. 1]. Es hat sich ein „frisches Wertversprechen“ gebildet, bei dem für Geschäftsmodelle mit KI nicht nur direkte Vorteile für das Unternehmen, sondern auch eine gesteigerte Aufmerksamkeit für das Unternehmen entstehen [BBB+18, S. 12].

Der KI-Einsatz in der strategischen Vorausschau und im Speziellen bei der Erstellung von Zukunftsszenarien ist bisher noch wenig erforscht [HWC24, S. 274], [KEK+23, S. 740]. In einer Studie von Kanoğlu gab jedoch ca. die Hälfte der Befragten an, dass die Integration von KI-gestützten Szenarien in Geschäftsprozesse von großer Bedeutung sei [Kan24, S. 8960]. Vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung der Potenziale aktueller Sprachmodelle und Bildgeneratoren, lässt sich die folgende Hypothese aufstellen.

„Der Einsatz von Künstlicher Intelligenz in der Szenario-Erstellung ermöglicht eine Reduktion der Aufwände sowie die gleichzeitige Steigerung der Qualität der Ergebnisse im Vergleich zu herkömmlichen Methoden.“

Der vorliegende Beitrag baut auf einer Forschungsarbeit auf [Ste24], die sich mit der Optimierung der Szenariotechnik auseinandergesetzt hat. Ein Teilaспект hiervon war der Einsatz von KI. Die oben aufgestellte Hypothese wird untersucht, indem die Ergebnisse dieser Arbeit zum Thema KI aufgegriffen und auf eines der eingesetzten Tools fokussiert werden. Die Untersuchung fand am Beispiel der Haushaltsgerätebranche statt. Der Beitrag diskutiert die gewonnenen Erkenntnisse. Abschließend geben die Autoren Handlungsempfehlungen für den Einsatz von KI in der Szenario-Erstellung und zeigen den weiteren Forschungsbedarf auf.

2 Prozess der KI-gestützten Szenario-Erstellung

Dieses Kapitel führt zunächst in die Szenariotechnik als Methode zur Szenario-Erstellung ein, wie sie im Rahmen dieser Veröffentlichung verwendet wurde. Es folgt ein Überblick über den

möglichen Einsatz von KI in diesem Prozess bevor anschließend entsprechende KI-Tools vorgestellt werden.

2.1 Erstellung von Zukunftsszenarien

Die Szenariotechnik stellt einen induktiven Ansatz der Szenario-Erstellung dar, der hauptsächlich in Europa verbreitet ist und sich vom deduktiven Ansatz des Scenario Planning, abgrenzt, der vor allem im anglo-amerikanischen Raum verwendet wird [SF11, 24 u. 48ff.], [van96, S. 202]. Bei der Szenariotechnik werden in einem Bottom-Up-Ansatz systematisch konsistente Zukunftsszenarien entwickelt. Diesem Beitrag liegt die Vorgehensweise des Teams „Advanced Systems Engineering“ (ASE) des Fraunhofer IAO zugrunde. Sie orientiert sich am Ansatz des Szenario-Management nach Gausemeier, Fink und Schlake [GFS95] und gliedert sich in fünf Phasen. (1) Zunächst werden das Gestaltungsfeld, für das die Zukunftsszenarien entwickelt werden sollen, sowie das Umfeld, das hierbei betrachtet wird, definiert. (2) Im nächsten Schritt werden in Recherchearbeit und Workshops Einflussfaktoren gesammelt, die innerhalb des Betrachtungsfeldes auf das Betrachtungsobjekt wirken. Diese werden z.B. nach PESTEL-Kategorien (Political, Economic, Social, Technological, Environmental, Legal) [Bun24-ol] strukturiert. Anschließend werden die Einflussfaktoren priorisiert und in der Anzahl reduziert, um die Szenario-Erstellung besser handhabbar zu machen und trennschärfere Ergebnisse zu erzielen [GF99, S. 92]. Hierzu werden in einer Einflussanalyse die Beziehungen zwischen den Faktoren untersucht. Am Ende dieses Schrittes entscheidet das Projekt-Team mithilfe eines System Grids, welche Einflussfaktoren als Schlüsselfaktoren ausgewählt werden. Ein System Grid ist eine Portfolio-Übersicht aller Faktoren anhand von Aktiv- und Passivsummen. (3) Im sogenannten Factbook werden die Schlüsselfaktoren definiert und anhand aktueller Daten und Trends eingeschätzt. Es dient als inhaltliche Basis für die zu erstellenden Szenarien. Diese Phase der Szenariotechnik ist sehr rechercheintensiv. Für jeden Schlüsselfaktor werden zwei bis vier mögliche zukünftige Entwicklungen festgehalten, die sogenannten „Projektionen“. (4) Mit einer Cross-Impact Bilanzanalyse bewertet das Projekt-Team im Anschluss, welche Projektionen sich sinnvoll ergänzen, im Sinne gegenseitiger Eintrittswahrscheinlichkeiten. Die Software „Scenario Wizard“ [Wei25] bildet auf dieser Grundlage konsistente Projektionsbündel, die dann zu Rohszenarien geclustert werden. Die Zahl der Szenarien ist frei wählbar, wobei in der Regel eine Anzahl von drei bis vier Szenarien sinnvoll ist, mit einem Szenario, das den aktuellen Trend extrapoliert, und wenigen weiteren, die andere mögliche Entwicklungen darstellen [WFM+18, S. 3]. Um die Phase der Szenario-Entwicklung abzuschließen, müssen die Szenarien für ihre Zielgruppe so aufbereitet werden, dass sie bestmöglich kommuniziert werden können und bspw. dem Management bei strategischen Entscheidungen den gewünschten Nutzen bringen. Für die Ausgestaltung bieten sich diverse Möglichkeiten an, von formalen Texten, fiktiven Geschichten, einer „Zeitung der Zukunft“ über Poster, Grafiken und andere Visualisierungen bis hin zu szenischen Darstellungen oder Filmen. (5) Der Szenario-Transfer ist je nach Definition Teil der Szenariotechnik oder der Methode nachgelagert und stellt die Verwendung der entwickelten Zukunftsszenarien dar. Da dieser Artikel sich auf die Erstellung von Szenarien fokussiert, wird auf den Szenario-Transfer nicht weiter eingegangen.

2.2 Potenziale des KI-Einsatzes in der Szenario-Erstellung

Der folgende kurze Überblick zeigt den Stand der Forschung in Bezug auf KI-gestützte Szenario-Prozesse und stellt direkt nutzbare KI-Tools vor mit einem Hinweis, an welchen Stellen im Prozess diese eingesetzt werden können. Für das Verständnis von KI wird diesem Beitrag die folgende Definition zugrunde gelegt.

„Künstliche Intelligenz sind IT-Lösungen und Methoden, die selbstständig Aufgaben erledigen, wobei die der Verarbeitung zugrundeliegenden Regeln nicht explizit durch den Menschen vorgegeben sind. Bisher erforderten diese Aufgaben menschliche Intelligenz und dynamische Entscheidungen. Jetzt übernimmt dies KI und lernt anhand von Daten, Aufträge und Arbeitsabläufe besser zu erledigen.“ [Sma25-ol]

Insgesamt sehen viele Autoren, dass sich KI besonders für den Umgang mit und die Analyse von großen Datenmengen eignet [Kan24, S. 8954], [KEK+23, S. 744], [MHW20, 17ff.]. Dies ist beispielsweise relevant für Patent Mining, (Literatur-) Recherchen und das Auswerten von Unternehmens- oder Kundendaten, alles Aufgaben, die in einem Szenario-Prozess anfallen können. Durch den reduzierten Datenerhebungsaufwand entstehen sowohl Effizienz- als auch Kostenvorteile [FSG+24], [KD22, S. 120]. Spaniol und Rowland stellen in Bezug auf die Szenario-Erstellung fest, dass auch suboptimale, wenig hilfreiche Antworten der KI zumindest einen Gedankenanstöß bieten können und dass ein hybrides Erstellen von Szenarien gemeinsam von KI und Mensch durchaus gute Ergebnisse erzielen kann [SR23, S. 7f.]. Ködding et al. gehen einen Schritt weiter, indem sie zwölf konkrete Anwendungsfälle für den Einsatz digitaler Technologien (insbesondere im Bereich der Künstlichen Intelligenz) in der Szenario-basierten Vorausschau definieren [KEK+23, S. 743]. Malakuczi et al. [MEG+] beleuchten insbesondere den letzten Schritt der Szenario-Erstellung. Sie diskutieren den Einsatz von KI für die Erstellung von Szenario-Beschreibungen auf Basis der Methode „Design Fiction“ sowie die Visualisierung von Szenarien. Dabei sehen sie generative KI-Tools (noch) nicht als Werkzeug, um ausgereifte Texte und Illustrationen zu Szenarien zu erstellen, sondern eher als Assistenten, die den kreativen Prozess beschleunigen können, indem sie erste Ideen liefern und Rückmeldungen zu Formulierungen geben.

Einige Autoren gehen auf mögliche Hürden ein, die einem Einsatz von KI in Szenario-Prozessen entgegenstehen. Eine generelle Herausforderung für die Integration von KI in Unternehmensprozesse ist die Akzeptanz durch die Anwendenden oder für die Empfänger der Szenarien [MHW20, S. 14]. Auch schlecht trainierte KI-Tools, Sicherheitsbedenken, ethische Fragestellungen und der Datenschutz können einen Einsatz erschweren oder verhindern [Kan24, S. 8954]. Zusätzlich stellen sogenannte „Halluzinationen“ ein Problem dar, also Inhalte, die zwar realistisch wirken, aber durch keine echten Quellen gestützt werden [Sie24-ol]. Ein weiteres Problem ist der sogenannte „Bias“, also die einseitige Darstellung von Inhalten auf Basis unzureichender Trainingsdaten.

Wie in Bild 1 dargestellt, verspricht der KI-Einsatz in der Szenariotechnik aus Sicht der Autoren aktuell an den folgenden Stellen die größten Mehrwerte. Neben sämtlichen Recherche- und Analyse-Tätigkeiten, z.B. für die Identifikation von Einflussfaktoren oder das Formulieren des

Factbooks, kann KI ebenfalls bei kreativen Schritten wie dem Bilden von Projektionen und dem Ausgestalten und Visualisieren der Szenarien unterstützen.

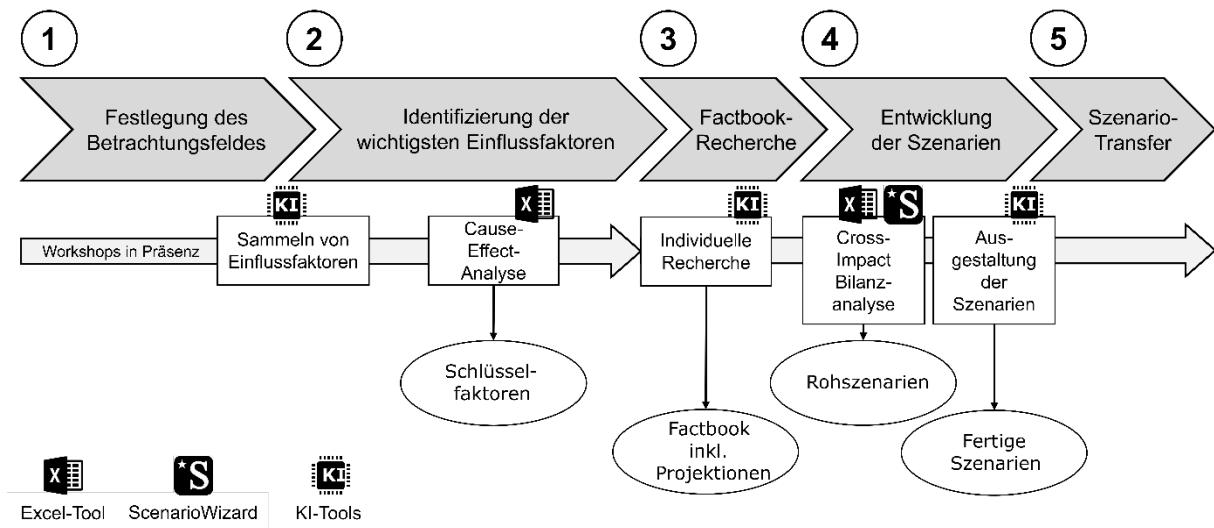


Bild 1: Ablauf der Szenario-Erstellung im Team ASE am Fraunhofer IAO (überarbeitete Darstellung aus [Ste24] nach [SWM19, S. 29])

Im Rahmen dieses Beitrags soll auf bereits verfügbare und über ein grafisches Interface nutzbare KI-Werkzeuge zurückgegriffen werden. Damit wird der Einsatz von KI anhand von Tools diskutiert, die in ähnlicher Form den meisten Nutzern zur Verfügung stehen. Im Folgenden werden im Rahmen der Recherche identifizierte KI-Werkzeuge kurz vorgestellt und den jeweiligen Phasen der Szenario-Erstellung zugeordnet. Wie Bild 1 zeigt, war der Einsatz von KI bei drei Phasen von hoher Relevanz: Sammeln von Einflussfaktoren, Factbook-Recherche und Ausgestaltung der Szenarien. Die folgenden Abschnitte konzentrieren sich auf diese Phasen.

2.2.1 Sammeln von Einflussfaktoren

Für das Sammeln von Einflussfaktoren wurden in der Recherche das **PESTEL KI-Tool** von InstantPersonas sowie der FhGenie identifiziert. Das PESTEL KI-Tool ist sehr minimalistisch gestaltet. Auf der zugehörigen Website fordert das Tool den Nutzer zu einer kurzen Beschreibung des Unternehmens auf, für das eine Recherche erstellt werden soll [Ins25-ol]. Anhand dieser Beschreibung führt das Tool eine PESTEL-Analyse durch und gibt zu jeder der sechs Kategorien einen kurzen Text als Ergebnis aus.

Der **FhGenie** ist ein Tool, das von der Fraunhofer-Gesellschaft gehostet wird und den eigenen Mitarbeitern zur Verfügung steht. Es enthält mehrere Sprachmodelle von OpenAI sowie den Bildgenerator DALL-E 3, wodurch es für Nutzer wie der bekannte KI-Chatbot ChatGPT vom gleichen Unternehmen verwendet werden kann. Modelle und einen Bildgenerator (DALL-E3). Durch das interne Hosting werden dabei trotzdem alle Anforderungen an den Datenschutz eingehalten. FhGenie kann eingesetzt werden, um direkt nach Einflussfaktoren zu fragen, bspw. mit folgendem Befehl (Prompt) „Welche Einflussfaktoren sollten in einem Szenario-Projekt zum Thema X betrachtet werden?“. Alternativ können konkrete Fragen zu einzelnen Themen

gestellt werden. Auch kann FhGenie bei der Formulierung von Beschreibungstexten von bereits identifizierten Einflussfaktoren unterstützen.

2.2.2 Factbook-Recherche

Die Factbook-Recherche ist ein besonders arbeits- und rechercheintensiver Teil des Szenario-Prozesses. Das Factbook umfasst in der Regel 80-120 Seiten. Es bildet die inhaltliche Grundlage der Szenarien und erfordert somit eine ausgiebige Auseinandersetzung mit den Einflussfaktoren und deren potenziellen Entwicklungen. Die Identifikation relevanter Literatur in Form von wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist essenziell für diesen Schritt. Oft werden auch Experten befragt. Verschiedene KI-Tools wurden als mögliche Unterstützung für diesen Schritt identifiziert.

KATI ist ein innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft entwickeltes Tool für die Literaturrecherche im Rahmen von Projekten im Bereich Technologie- und Innovationsmanagement. Wie auch bei den anderen Tools, startet die Recherche mit KATI mit der Eingabe der Suchanfrage. KATI kann den aktuellen Stand der Forschung eines Themas und mögliche zukünftige Entwicklungen analysieren. Ferner ist eine Betrachtung der relevanten Forschungseinrichtungen und Forschenden für das Themengebiet möglich, um so weitere Informationen zu erlangen.

Als Open-Source-Tool für die Factbook-Recherche wurde **ORKG Ask** identifiziert. ORKG Ask ermöglicht die Suche nach Quellen über die Eingabe einer konkret ausformulierten Frage. Die KI verarbeitet die Anfrage und durchsucht die CORE-Datenbank, die weltgrößte Sammlung an frei zugänglichen wissenschaftlichen Publikationen [COR25-01]. Die relevanten Veröffentlichungen stellt das Tool inklusive Zusammenfassungen und Kernaussagen in einer Liste auf der Ergebnisseite dar. Zusätzlich wird eine Antwort auf die gestellte Frage generiert, basierend auf den fünf wichtigsten Veröffentlichungen. Die Veröffentlichungen können nach Jahr, Sprache oder sonstigen Kriterien gefiltert werden. Zusätzlich können Veröffentlichungen aus der Liste als irrelevant eingestuft werden. Mit dieser Darstellung der Ergebnisse bietet ORKG Ask für die Factbook-Recherche die Möglichkeit, durch das Stellen von gezielten Fragen einen Überblick über einzelne Einflussfaktoren zu erhalten. Das inkludiert sowohl den aktuellen Stand als auch von Wissenschaftlern erwartete zukünftige Entwicklungen, die als Ausgangspunkt für die Projektionen verwendet werden können.

Statista Research AI ergänzt die Gruppe der KI-Tools für die Factbook-Recherche. Analog zu den anderen Tools erfolgt die Recherche mit Research AI durch das Stellen einer Frage über ein Eingabefeld. Als Ergebnis wird, wie bei ORKG Ask, die gestellte Frage in Form eines kurzen Textes beantwortet, der auf den fünf relevantesten Quellen bzw. Datensätzen basiert. Die Quellen werden im Text referenziert und darunter aufgelistet. Da das Tool auf die Statista-Datenbank zurückgreift, bietet es sich vor allem für die Recherche des aktuellen Standes von Einflussfaktoren an. So wird das Factbook mit Zahlen und Fakten gefüllt, die dem Projektteam ein möglichst gutes Bild der Faktoren und eine Wissensgrundlage für Formulierungen der Projektionen und für spätere Schritte in der Szenariotechnik ermöglichen.

FhGenie kann als universeller Chatbot auch für die Factbook-Recherche eingesetzt werden. Da es nicht direkt auf eine Datenbank von wissenschaftlichen Veröffentlichungen zurückgreift, hat

FhGenie in diesem Schritt einen eher unterstützenden Charakter ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Korrektheit der Antworten. Neben der Funktion als „Gesprächspartner“ für thematische Gedankenanstöße, bietet sich die Verwendung von FhGenie auch für die Formulierung der Texte für das Factbook an. So können z.B. Ergebnisse der anderen Tools und einer klassischen Recherche zu einheitlichen Texten zusammengefasst werden.

2.2.3 Ausgestaltung der Szenarien

Bei der Szenario-Ausgestaltung handelt es sich zum Teil um einen kreativen Prozess. Um eine Beschreibung der finalen Zukunftsszenarien zu erstellen, können FhGenie die notwendigen Informationen bereitgestellt werden. Dies kann über eine ausführliche Aufgabenstellung oder über das Hochladen einer Datei geschehen. Damit FhGenie die Szenarien möglichst gut versteht, bietet es sich hierbei an, alle Schlüsselfaktoren inklusive ihrer Szenario-spezifischen Ausprägungen aufzulisten und zu definieren, welche Aspekte für das jeweilige Szenario von besonderer Bedeutung sind. Je nachdem, in welcher Form die Ausgestaltung der Szenarien erfolgen soll, kann der Prompt für die KI auf eine eher neutrale Beschreibung oder kreative Formulierungen ausgerichtet sein. In allen Fällen ist der Output von FhGenie nicht als finales Ergebnis, sondern als Grundlage zur weiteren Bearbeitung sowie als kreative Anregung für eigene Ideen zu sehen.

Auch die visuelle Ausgestaltung der Szenarien lässt sich durch FhGenie unterstützen, mit dem Bildgenerator DALL-E. Auch hier sollten ausreichend Informationen über die Szenarien vorgegeben werden, um möglichst gute Ergebnisse zu erzielen. Mit dem Tool lassen sich gesamte Szenarien oder auch nur Teilespekte visualisieren. Es können auch verschiedene Stile wie z.B. fotorealistische Darstellungen, gezeichnete Bilder oder abstrakte Grafiken erzeugt werden. Die Ergebnisse sind ebenfalls nicht als final zu sehen. Sie können mit gängiger Grafik-Software bearbeitet oder ähnlich nachgebaut werden und bilden in erster Linie eine Grundlage für die Ausgestaltung durch das Projektteam.

3 Test am Beispiel der Haushaltsgerätebranche

Die identifizierten KI-Tools wurden 2024 beispielhaft getestet. Hierfür wurde die Szenariotechnik in teilweise verkürzter Form durchgeführt, unterstützt durch die Anwendung ausgewählter KI-Tools an den entsprechenden Prozessschritten. Die Wahl des Praxisbeispiels, die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse des Testlaufs werden im folgenden Kapitel vorgestellt. Auf Toolseite beschränken sich die folgenden Abschnitte auf den Einsatz des FhGenie, der an verschiedenen Stellen genutzt werden konnte. Der Schwerpunkt wurde gewählt, um aufzuzeigen, dass selbst mit einfachen Tools, die einer breiten Menge an Nutzern zur Verfügung stehen, bereits gute Ergebnisse erzielt werden können.

3.1 Wahl des Praxisbeispiels

Der Testlauf der Szenario-Erstellung mit Unterstützung von KI-Tools wurde im Themenfeld „Frugale Haushaltsgeräte“ durchgeführt. Das ASE-Team am Fraunhofer IAO forscht bereits

seit vielen Jahren am Thema Frugale Innovationen, im Sinne einfacher, nachhaltiger und kostengünstiger Lösungen. Gemeinsam mit dem Nachbarinstitut Fraunhofer IPA (Institut für Produktionstechnik und Automation) betreut es das Fraunhofer Zentrum für Frugale Produkte und Produktionssysteme. Was Industriesektoren betrifft, hat das Team unter anderem besondere Expertise im Bereich der Haushaltsgeräte aufgebaut. Für den Test wurde auf dieser Grundlage entschieden, die Zukunft der Haushaltsgeräte zu untersuchen, mit einem besonderen Fokus auf der Rolle frugaler Lösungen. Darüber hinaus wurde der zeitliche Horizont auf das Jahr 2040 und der regionale Fokus auf Europa bzw. europäische Unternehmen gelegt. Das Thema des Szenario-Projektes lautete damit „**Frugale Innovationen in der europäischen Haushaltsgerätebranche im Jahr 2040**“.

3.2 Durchführung des Tests

Mit dem oben definierten Projektthema wurde im Rahmen des Testlaufs der gesamte Prozess der Szenariotechnik in verkürzter Form durchlaufen. Um den Prozess zu verkürzen, wurden insbesondere die Schritte vereinfacht, in denen keine KI-Tools zum Einsatz kamen. Außerdem wurde die Zahl an Einflussfaktoren, Projektionen, usw. beschränkt. Ziel war es, trotz der Verkürzung alle relevanten Zwischen- und Endergebnisse zu erhalten, um diese für anschließende Arbeiten nutzen zu können. Der Testlauf wurde von einer Evaluation begleitet, bei der die Mitglieder des Projekt-Teams über Online-Fragebögen eine Einschätzung zu den KI-Tools und ihrer Nutzung gaben.

Im Folgenden werden die Prozessschritte dargestellt, in denen die KI-Tools eingesetzt wurden, und es wird erörtert, wie dieser Einsatz bewertet wurde. Nach einem Kick-Off-Meeting, in dem die finale Eingrenzung des Projektthemas stattfand, begann das Sammeln von Einflussfaktoren. Hierzu nutzte das Projekt-Team neben vorgefertigter Trendkarten zusätzlich FhGenie. Das Tool diente zum einen der konkreten Recherche nach Einflussfaktoren; zum anderen wurde es zur Formulierung der Titel und Beschreibungen der Faktoren verwendet. In mehreren Iterationen wurden die Einflussfaktoren im Anschluss durch das Team nach PESTEL-Kategorien sortiert, inhaltlich überarbeitet und, falls sinnvoll, zusammengeführt oder durch weitere Faktoren ergänzt. Die Evaluation ergab, dass die Teilnehmenden durch die KI-Nutzung schnell und intuitiv einen Einstieg in das Thema und die Recherche fanden. Das Vertrauen in die inhaltliche Qualität der Antworten des Chatbots war jedoch begrenzt.

Der nächste Schritt, in dem Künstliche Intelligenz eingesetzt wurde, war die Erstellung des Factbooks. FhGenie half hier geeignete Quellen für aktuelle Daten und Trends zu identifizieren und diese zu prägnanten Texten auszuformulieren. Jeder Schlüsselfaktor erhielt eine Seite im Factbook mit den drei Feldern „Definition“, „Aktueller Stand (Fakten und Trends)“ und „Projektionen“. Der Schwerpunkt innerhalb des Tests lag auf den Projektionen, da diesen einen essenziellen Teil der Szenarien darstellen. Der Einsatz von FhGenie wurde hier wieder als guter Einstieg in die Arbeit bewertet und als hilfreich, um den Aufwand zu reduzieren. Eine Grundskepsis gegenüber den Antworten des Chatbots war jedoch vorhanden. Zudem äußerten die Teilnehmenden, dass sie große Unterschiede in den Ergebnissen wahrnahmen, je nachdem,

welchen Prompt sie wählten. Analog zum Formulieren der Einflussfaktoren, wurden die in Einzelarbeit mit der KI erstellten Inhalte gemeinsam im Projekt-Team diskutiert und überarbeitet bis das Factbook final freigegeben wurde.

Zur Ausgestaltung der Szenarien wurde FhGenie ein Dokument zur Verfügung gestellt, das die Themenstellung, das vollständige Factbook inklusive der Projektionen sowie die geclusterten Rohszenarien enthielt. Für die Rohszenarien wurde angegeben, welche Projektionen als am wichtigsten eingestuft wurden. In den Prompts wurden der Aufbau und der Inhalt des Dokuments erläutert. Als erstes wurden mit FhGenie zusammenfassende Kurzbeschreibungen für die drei Rohszenarien erstellt, danach ausführlichere „Storylines“. Im folgenden Schritt wurde eine Visualisierung angefertigt. Der Prompt wurde hierbei bewusst simpel gehalten und forderte lediglich dazu auf, eine Grafik für das Szenario zu erzeugen, die ein Gefühl für die Situation und die Bedürfnisse der Nutzer im Szenario verdeutlicht. Als zweite Variante wurde FhGenie gebeten, eine „Storyline“ zu formulieren, die das Leben einer fiktiven Person („Persona“¹) im Szenario beschreibt sowie eine Illustration, die dieses beispielhaft darstellt. Die generierten Texte wurden in der Evaluation grundsätzlich gut bewertet, gleichzeitig gab es aber an allen Texten noch Bedarf zur Korrektur bzw. Konkretisierung. Ein Kritikpunkt war, dass die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Faktoren eines Szenarios nicht schlüssig formuliert waren. Auf eine sinnvolle Beschreibung, wie Entwicklungen zur Entstehung eines Szenarios geführt haben könnten, wurde vermisst. Die Persona-basierten Texte wurden tendenziell besser bewertet. Zu den Grafiken gab es gemischte Rückmeldungen, doch auch hier wurden die Persona-basierten Varianten bevorzugt. Alle Teilnehmenden der Evaluation gaben an, FhGenie auch in zukünftigen Projekten für die Ausgestaltung von Szenarien in Erwägung ziehen zu wollen. Diese Erfahrungen bestätigen die in Kapitel 2.2 genannte Literatur in der Aussage, dass KI kreative Arbeit nicht ersetzt, aber als Werkzeug unterstützen und beschleunigen kann.

3.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die drei Szenarien kurz vorgestellt, jeweils anhand eines Textes und einer Illustration.

Im ersten Szenario ist das Thema Nachhaltigkeit der entscheidende Treiber frugaler Lösungen, insbesondere im Hinblick auf ökologische Aspekte. Sowohl die Vorgaben der Politik als auch das Bewusstsein in der Gesellschaft sorgen hier dafür, dass leicht zu reparierende und recyclingfähige Haushaltsgeräte nachgefragt sind. Das zweite Szenario ist geprägt von wirtschaftlicher Rezession und einer angespannten sozialen Lage. Die Nachfrage nach kostengünstigen, einfachen Haushaltsgeräten im Sinne frugaler Produkte entsteht hier vor allem durch beschränkte finanzielle Ressourcen. Gemeinschaftliche Wohnformen helfen Kosten zu sparen und bieten zugleich Sicherheit in einer unsicheren Welt. Im dritten Szenario ist es der Wunsch nach Einfachheit, der frugalen Produkten Auftrieb gibt.

¹ Eine Persona ist eine fiktive Person, die auf Basis von Erkenntnissen zu tatsächlichen oder möglichen Personen erstellt wird. Personas sind eine typische Methode agiler Vorgehensweisen wie Design Thinking. Sie werden oft zu relevanten Anspruchsgruppen wie Anwendern erstellt. [VV17, S. 90f.]

Typische Schritte nach der Szenarienerstellung, die in diesem Artikel nicht mehr betrachtet werden, sind die Ableitung konkreter unternehmensspezifischer Maßnahmen und ihre Integration in eine Roadmap. Üblicherweise wird dabei vorwiegend ein Szenario betrachtet unter Berücksichtigung ausgewählter Aspekte der anderen. Auch die Analyse sogenannter Disruptoren findet an dieser Stelle statt, im Sinne einer Betrachtung kritischer Ereignisse, die alle Szenarien beeinflussen würden (wie in der Vergangenheit beispielsweise die Covid-Pandemie).

In der zugrundeliegenden Forschungsarbeit [Ste24] wurden zwei verschiedene Arten der Aufbereitung getestet: Eine eher generelle, objektive, die sich auf eine reine Zusammenfassung der wichtigsten Punkte beschränkt, und eine individuelle, subjektive, die anhand einer Persona formuliert wurde. In der vorliegenden Arbeit wurde FhGenie genutzt, um beide Arten der Szenario-Darstellung miteinander zu vergleichen. Die Persona-basierte Darstellung wurde bei allen drei Szenarien als weitaus sinnvoller eingeschätzt, deshalb beschränken sich die folgenden Unterkapitel auf diese Art der Aufbereitung. Die untenstehende Tabelle 1 zeigt vorab auszugsweise einen direkten Vergleich anhand des ersten Szenarios. Bild 2 und 3 ergänzen die textuelle Beschreibung.

Tabelle 1: Vergleichende auszugsweise Darstellung des Szenarios „Der smarte Haushalt“ (Texte und Bilder sind KI-generiert)

Neutrale Aufbereitung	Persona-basierte Aufbereitung
Im Jahr 2040 hat sich der europäische Markt für Haushaltsgeräte zu einem Zentrum für Gesundheit und Nachhaltigkeit entwickelt. Mit einer stabilen Erholung des Einkommens und Wohlstands ist der Zugang zu hochwertigen, intelligenten Geräten für viele Verbraucher erleichtert worden. Grüne, vernetzte Haushaltsgeräte stehen im Vordergrund, die nicht nur funktional sind, sondern auch als Statussymbole fungieren. Intelligente Kühlschränke und multifunktionale Kochgeräte analysieren Gesundheitsdaten und geben personalisierte Ernährungsempfehlungen.	Im Jahr 2040 hat sich der Alltag von Anna, einer alleinerziehenden Mutter in einer pulsierenden Stadt, drastisch verändert. Ihre Wohnung ist mit intelligenten, vernetzten Haushaltsgeräten ausgestattet, die nicht nur ihre täglichen Aufgaben erleichtern, sondern auch ihre Gesundheit unterstützen. Der Kühlschrank analysiert ihre Essgewohnheiten, schlägt gesunde Rezepte vor und bestellt automatisch frische Zutaten. Anna genießt die Zeit mit ihren Kindern und muss sich nicht mehr um das Kochen kümmern, da die Geräte die Zubereitung automatisiert haben.

Tabelle 2: Fortsetzung Tabelle 1: Vergleichende auszugsweise Darstellung des Szenarios „Der smarte Haushalt“ (Texte und Bilder sind KI-generiert)

Neutrale Aufbereitung	Persona-basierte Aufbereitung
 <p><i>Bild 2: KI-generierte Illustration des Szenarios „Der smarte Haushalt“, basierend auf neutralem Text</i></p>	 <p><i>Bild 3: Persona-basierte, KI-generierte Illustration des Szenarios „Der smarte Haushalt“</i></p>

3.3.1 Szenario 1: „Der smarte Haushalt“

Der nachfolgende Text sowie die zugehörige Bilde 4 wurden durch eine KI generiert.

Im Jahr 2040 hat sich der Alltag von Anna, einer alleinerziehenden Mutter in einer pulsierenden Stadt, drastisch verändert. Ihre Wohnung ist mit intelligenten, vernetzten Haushaltsgeräten ausgestattet, die nicht nur ihre täglichen Aufgaben erleichtern, sondern auch ihre Gesundheit unterstützen. Der Kühlschrank analysiert ihre Essgewohnheiten, schlägt gesunde Rezepte vor und bestellt automatisch frische Zutaten. Anna genießt die Zeit mit ihren Kindern und muss sich nicht mehr um das Kochen kümmern, da die Geräte die Zubereitung automatisiert haben.

Die hohe Arbeitsbelastung und der Druck des urbanen Lebens haben jedoch auch ihre Schattenseiten. Trotz der technologischen Unterstützung bleibt der Zugang zu diesen innovativen Geräten für viele Familien eine Herausforderung. Während wohlhabendere Haushalte profitieren, kämpft Anna darum, ihre Finanzen im Gleichgewicht zu halten. Die Regierung hat jedoch Programme eingeführt, um den Zugang zu diesen Technologien für einkommensschwächere Familien zu verbessern. Das Bewusstsein für Gesundheit und Wohlbefinden ist zu einem Statussymbol geworden, und der Markt für intelligente Haushaltsgeräte boomt.



Bild 4: Persona-basierte, KI-generierte Illustration des Szenarios „Der smarte Haushalt“

3.3.2 Szenario 2: „Gemeinschaftliche Haushalte“

Der nachfolgende Text sowie das dazugehörige Bild 5 wurden durch eine KI generiert.

Im Jahr 2040 leben in der Stadt immer mehr Menschen in gemeinschaftlichen Wohnformen. Maria, eine 70-jährige Rentnerin, teilt sich eine große Wohnung mit mehreren anderen Senioren und einer Familie. Die neue Wohnform fördert den Austausch und das Teilen von Ressourcen. In der gemeinsamen Küche stehen moderne, multifunktionale Geräte, die von allen Bewohnern genutzt werden. Reparaturen und Wartungen der Geräte werden gemeinsam organisiert, und es gibt regelmäßige Treffen, um die gemeinschaftliche Nutzung und nötige Neuanschaffungen zu besprechen.

Die wirtschaftlichen Unsicherheiten in der Welt haben dazu geführt, dass das Teilen von Ressourcen und die Rückkehr zur Einfachheit an Bedeutung gewinnen. Die Menschen legen Wert auf nachhaltige und reparierbare Produkte, und lokale Initiativen zur Selbstreparatur blühen auf. Marias Gemeinschaft nutzt innovative Ansätze, um die Lebensqualität zu verbessern, und versteht sich als solidarische Einheit, die den Herausforderungen des Alters und der wirtschaftlichen Unsicherheit gemeinsam begegnet.



Bild 5: Persona-basierte, KI-generierte Illustration des Szenarios

3.3.3 Szenario 3: "Rückkehr zur Einfachheit"

Der nachfolgende Text sowie das dazugehörige Bild 6 wurden durch eine KI generiert.

Im Jahr 2040 hat sich das Konsumverhalten vieler Menschen geändert. Peter, ein 35-jähriger Grafikdesigner, lebt in einer kleinen Wohnung und hat sich bewusst für einen minimalistischen Lebensstil entschieden. Er nutzt einfache, robuste Haushaltsgeräte, die nicht vernetzt sind. Die Geräte sind leicht zu bedienen, langlebig und einfach zu reparieren. Wie viele Menschen im Jahr 2040, ist Peter müde von der ständigen digitalen Vernetzung und sehnt sich nach Einfachheit und Authentizität im Alltag.

Trotz der Verfügbarkeit smarter Technologien entscheiden sich viele für traditionelle Geräte, die keine komplizierte Technik erfordern. Peters Küche ist mit einem klassischen Herd, einem mechanischen Mixer und einem Kühlschrank ausgestattet, der grundlegende Funktionen erfüllt. Die Nachfrage nach solchen Geräten ist gestiegen, und Hersteller reagieren auf den Trend, indem sie funktionale und langlebige Produkte anbieten. In einer Welt voller Unsicherheiten und Herausforderungen ist der Rückzug ins Einfache für viele eine bewusste Entscheidung und eine Quelle des Wohlbefindens.



Bild 6: Persona-basierte, KI-generierte Illustration des Szenarios „Rückkehr zur Einfachheit“

4 Diskussion und Fazit

Die Anwendung von KI in der strategischen Vorausschau hat ein großes Potenzial den Prozess zu beschleunigen und auch die Ergebnisse zu verbessern, wenn bestimmte Vorkehrungen getroffen werden. Die folgenden Abschnitte beschreiben Handlungsempfehlungen für die Praxis unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der Autoren und einen Ausblick zu anschließendem Forschungsbedarf.

4.1 Handlungsempfehlungen für die Praxis

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits allein durch den Einsatz einfacher KI-Tools ein großer Gewinn an Effizienz und Effektivität erreicht werden kann. Insbesondere die Fähigkeit der KI-

Werkzeuge große Datenmengen effizient auszuwerten, hat Vorteile für die Identifizierung relevanter Einflussfaktoren, die Factbook-Recherche und die Szenario-Generierung (Schritte 2-4). Interessant ist auch die Möglichkeit, in sehr kurzer Zeit auf Basis vorhandener Ergebnisse verschiedene Auswertungsvarianten zu erstellen, z.B. bei der Ausgestaltung von Szenarien in Text- und Bildform (Schritt 4). Mitarbeitende sollten zur Nutzung der KI-Tools motiviert werden indem sowohl Nutzungs- und Schulungsangebote als auch ein entsprechendes organisatorisches Setting (z.B. durch Betriebsvereinbarungen zur Nutzung von KI) von Seiten des Unternehmens bereitgestellt werden.

Zu berücksichtigen ist, dass KI-Tools zum sogenannten „Halluzinieren“ neigen, d.h. sie können falsche Informationen als richtig darstellen. Dem muss durch detailliertes Prüfen von angegebenen Quellen und das Verifizieren von Erkenntnissen durch Themenexperten entgegengewirkt werden. Auch der eigene kritische Blick ist unerlässlich, z.B. bei der Prüfung generierter Rohszenarien. Bei der Nutzung von KI-Tools für kreative Tätigkeiten sollten die Ergebnisse ebenfalls überprüft und mit vorher definierten Anforderungen abgeglichen werden. Hier bietet sich eine Überprüfung durch mindestens zwei Personen an.

4.2 Weiterer Forschungsbedarf

Was den weiteren Forschungsbedarf betrifft, bieten sich mehrere Arbeiten an. Zum einen lohnt sich die tiefergehende Prüfung des Einsatzes weiterer KI-Tools, insbesondere solcher, die explizit der strategischen Vorausschau dienen. Zum anderen wäre ein Parallel-Test sinnvoll, der die Ergebnisse eines klassischen und eines KI-gestützten Projekts zu einem vergleichbaren Thema gegenüberstellt. Zusätzlich bieten KI-Tools die Möglichkeit ohne großen Aufwand ganz neue Formate zu testen, wie eine kombinierte Top-Down und Bottom-Up Szenario-Erstellung oder neue Formen der Szenario-Kommunikation (z.B. als Podcast). Bei weiterführenden Tests empfiehlt es sich Branchenexperten des jeweiligen Szenario-Themas zu involvieren, um die KI-generierten Inhalte zu validieren.

Literatur

- [BBB+18] BALADA, C.; BELLANOVA, A.; BRUSS, M.; BUCHBERGER, S.; CIRULLIES, J.; DEL CORRO, L.; HOLTEL, S.; HARTMANN, T.; WEBER, M. (Hrsg.): Digitalisierung gestalten mit dem Periodensystem der Künstlichen Intelligenz – Ein Navigationssystem für Entscheider. Bitkom Bundesverband Informationswirtschaft Telekommunikation und neue Medien e.V, Berlin, 2018
- [Bun24-ol] BUNDESMINISTERIUM DES INNERN: PESTEL-Methode. Unter: https://www.orghandbuch.de/Webs/OHB/DE/OrganisationshandbuchNEU/4_MethodenUndTechniken/Methoden_A_bis_Z/PESTEL_Methode/PESTEL_Methode_node.html, 19. Juni 2025
- [COR25-ol] CORE: CORE – Aggregating the world's open access research papers. Unter: <https://core.ac.uk/>, 19. Juni 2025
- [FSG+24] FINKENSTADT, D. J.; SOTIRIADIS, J.; GUINTO, P.; EAPEN, T.: Contingency Scenario Planning using Generative AI. SSRN Electronic Journal, 2024
- [GF99] GAUSEMEIER, J.; FINK, A.: Führung im Wandel – Ein ganzheitliches Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung. Hanser, München, 1999
- [GFS95] GAUSEMEIER, J.; FINK, A.; SCHLAKE, O.: Szenario-Management – Planen und Führen mit Szenarien. Hanser, München, 1995

[HWC24] HAO, H.; WANG, Y.; CHEN, J.: Empowering Scenario Planning with Artificial Intelligence: A Perspective on Building Smart and Resilient Cities. *Engineering*, (43), 2024, S. 272–283

[Ins25-ol] INSTANTPERSONAS: AI PESTEL Analysis Generator. Unter: <https://pestel.dev/>, 19. Juni 2025

[Kan24] KANOĞLU, M. F.: The Importance of Creating Artificial Intelligence Supported Future Scenarios in Decision Making Processes. *International Journal of Current Science Research and Review*, (07)12, 2024

[KD22] KÖDDING, P.; DUMITRESCU, R.: Szenario-Technik mit digitalen Technologien. In: Hartmann, E. A. (Hrsg.): *Digitalisierung souverän gestalten II*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2022, S. 120–135

[KEK+23] KÖDDING, P.; ELLERMANN, K.; KOLDEWEY, C.; DUMITRESCU, R.: Scenario-based Foresight in the Age of Digitalization and Artificial Intelligence – Identification and Analysis of Existing Use Cases. *Procedia CIRP*, (119), 2023, S. 740–745

[MEG+] MALAKUCZI, V.; ERSHOVA, M.; GENTILE, A.; GIRONI, C.; SAVIANO, M.; IMBESI, L.: Design in dialogue: AI as an aid of imagination for future scenarios: DRS2024: Boston. DRS2024: Boston, 6/23/2024 - 6/28/2024, Proceedings of DRS, Design Research Society, 2024

[MHW20] MÜLLER-MARKUS, C.; HEIMISCH-RÖCKER, A.; WÜRF, V. (Hrsg.): *Künstliche Intelligenz in der Industrie – Warum ist KI für die Industrie wichtig?, Was kann KI heute und in Zukunft?, KI in Deutschland und im internationalen Vergleich, Handlungsfelder und Gestaltungsoptionen*. acatech Horizonte, acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München, 2020

[RKS23] RIEDEL, O.; KÜRÜMLIOGLU, M.; SCHNEIDER, B.: Advanced Systems Engineering. In: Spath, D.; Westkämper, E. (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung*. VDI Springer Reference, Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2023, S. 1–24

[SF11] SIEBE, A.; FINK, A.: *Handbuch Zukunftsmanagement – Werkzeuge der strategischen Planung und Früherkennung*. 2. Auflage, Business 2011, Campus Verlag GmbH, Frankfurt am Main, 2011

[Sie24-ol] SIEBERT, J.: Halluzinationen von generativer KI und großen Sprachmodellen (LLMs) - Blog des Fraunhofer IESE. Unter: <https://www.iese.fraunhofer.de/blog/halluzinationen-generative-ki-llm/>, 20. Juni 2025

[SJH24] STOWASSER, S.; JESKE, T.; HARLACHER, M.: Artificial intelligence (AI) in the manufacturing industry. *Research Features*, 2024

[Sma25-ol] SMARTAIWORK: Zukunft der Betriebsabläufe: Sachbearbeitung zukunftsorientiert gestalten mit Automatisierung durch Künstliche Intelligenz. Unter: <https://www.smart-ai-work.de/>, 19. Juni 2025

[SR23] SPANIOL, M. J.; ROWLAND, N. J.: AI-assisted scenario generation for strategic planning. *FUTURES & FORESIGHT SCIENCE*, (5)2, 2023

[Ste24] STEIERT, L.: Entwicklung und Test eines durchgängigen IT-gestützten Methodenbausatzes zur effizienten Erstellung von Zukunftsszenarien. Masterarbeit, Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart, 2024

[SWM19] SCHÜLE, S.; WOHLFART, L.; MASIOR, J.: *Strategische Vorausschau mit Szenarien: Fallstudien zum Technologie- & Innovationsmanagement*. Springer Gabler, 2019, Wiesbaden, 2019

[van96] VAN DER HEIJDEN, K.: *Scenarios – The art of strategic conversation*. John Wiley & Sons, Chichester, England, 1996

[VV17] VISOCKY O'GRADY, J.; VISOCKY O'GRADY, K.: *A designer's research manual – Succeed in design by knowing your clients + understanding what they really need*. Rockport Pub, Beverly, MA, 2017

[Wei25] WEIMER-JEHLE, W.: *ScenarioWizard: Qualitative System- und Szenarioanalyse mit der Cross-Impact Bilanzanalyse*. ZIRIUS, Universität Stuttgart, 2025

[WFM+18] WOHLFART, L.; FORTWINGEL, M.; MASIOR, J.; SCHÜLE, S.: Integrated Strategy Development with Future Scenarios. In: R&D Management Conference 2018 (Hrsg.): R&Designing Innovation: Transformational Challenges for Organizations and Society. Milan, Italy, June, 30th - July, 4th, 2018

Autoren

Lukas Steiert, M. Sc. studierte Technologiemanagement an der Universität Stuttgart und beschäftigte sich bereits in seiner Masterarbeit in Kooperation mit dem Fraunhofer IAO mit dem Thema Vorausschau, insbesondere mit der Szenariotechnik. Seit Anfang 2025 ist er als akademischer Mitarbeiter am Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart tätig. Sein hauptsächliches Forschungsgebiet liegt in der Produktentwicklung. Hierzu betreut er eine Lehrveranstaltung inklusive Semesterprojekten für den Studiengang Technologiemanagement.

Liza Wohlfart ist Wissenschaftlerin am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO. Als Leiterin des Zentrums für frugale Produkte und Produktionssysteme (ZFP) beschäftigt sie sich seit mehr als 15 Jahren mit der Erforschung der Erfolgsfaktoren und Potenziale einfacher, kostengünstiger und nachhaltiger Lösungen (= Frugaler Innovationen). Ein weiteres, wichtiges Forschungsgebiet von Liza Wohlfart ist das Thema strategische Vorausschau, basierend auf Methoden wie Zukunftsszenarien und Trendradaren.

Benjamin Schneider, M. Sc. studierte Technologiemanagement (B. Sc.) und Maschinenbau (M. Sc.) an der Universität Stuttgart. Seit 2017 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO in der Abteilung Advanced Systems Engineering. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Advanced Systems Engineering, Foresight, Künstliche Intelligenz in der Produktentwicklung, Produktlebenszyklusmanagement und nachhaltige und kreislauffähige Systemgestaltung.

Dipl.-Ing. Stephan Schüle studierte Maschinenwesen an der Universität Stuttgart. Er arbeitet seit 2005 am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO in der Abteilung Advanced Systems Engineering. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen in den Bereichen F&E-Strategie, Foresight, Szenariotechnik, Produktlebenszyklusmanagement und Advanced Systems Engineering.

Prof. Dr. Katharina Hözle ist Professorin und Leiterin des Instituts für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart sowie geschäftsführende Institutsleiterin des Fraunhofer Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO. Zuvor war sie Professorin am Hasso-Plattner-Institut der Universität Potsdam. Seit April 2023 ist sie Technologiebeauftragte der Wirtschaftsministerin Baden-Württembergs. Frau Prof. Hözle war von 2018 bis 2022 stellvertretende Vorsitzende der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) sowie Mitglied des Hightech-Forums der Bundesregierung. Sie ist Mitglied bei acatech, der deutschen Akademie der Technikwissenschaften. Ihre Forschungsgebiete sind Technologie- und Innovationsmanagement, Arbeitswissenschaft und die digitale Transformation. Ein Schwerpunkt ist dabei immer die Interaktion Mensch – Technologie – Organisation und die Bedeutung des Menschen in der Technologieentwicklung und -anwendung.

Session V

(Technologie-)Roadmapping in Forschungsorganisationen: Herausforderungen und Gestaltungshinweise

Flavius Sturm¹, Diana Freudendahl¹, Marco Gallasch², Sven Schimpf³

¹ *Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen INT,*

flavius.sturm@int.fraunhofer.de, diana.freudendahl@int.fraunhofer.de

² *Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik FHR,*

marco.gallasch@fhr.fraunhofer.de

³ *Fraunhofer-Verbund Innovationsforschung, sven.schimpf@innovation.fraunhofer.de*

Zusammenfassung

Das Roadmapping gilt als universelles, leistungsfähiges Instrument der strategischen (Technologie-)Planung, welches jedoch für seinen Einsatzzweck angepasst werden muss. Der vorliegende Beitrag thematisiert die Anwendung des Roadmapping für Forschungsorganisationen. Nach einer Beschreibung der Besonderheiten der Langfristplanung für diesen Organisationstyp, wird die Anwendung des Roadmapping in einer Forschungsorganisation beschrieben. Ausgehend vom „T-Plan“-Roadmapping-Konzept werden Modifikationen und Lösungsansätze vorgestellt, die die spezifischen Herausforderungen des Roadmapping in der vorgestellten Forschungsorganisationen addressieren. Hierbei wird auf die Erfahrungen zurückgegriffen, die bei der Erstellung von drei „Pilot-Roadmaps“ in insgesamt 14 Workshops gemacht wurden.

Schlüsselworte

Technologieroadmapping, Forschungsorganisation, Fallstudie

(Technology) Roadmapping in Research Organizations: Challenges and Recommendations

Abstract

Technology roadmapping is considered a universal, yet powerful instrument for technology planning. However, it has to be adapted for its intended use. This paper addresses the application of roadmapping in research organizations. After explaining some of the particularities of long-term planning within this type of organizations, the application of the roadmapping process is described in more detail. For this purpose, the 'T-Plan' roadmapping approach, a widely known roadmapping concept, is used and modified to address the specific needs of the research organization. The modifications are based on the experience drawn from the creation of three 'pilot roadmaps' over the course of 14 workshops.

Keywords

Technology Roadmapping, Research Organisation, Case Study

1 Einführung & Problemstellung

Roadmapping hat sich in den letzten fünf Jahrzehnten zu einer leistungsfähigen wie pragmatischen Methode der strategischen Planung entwickelt, die speziell in technologieintensiven Unternehmen einen hohen Verbreitungsgrad erfährt. Gerade für diese Art von Organisationen spielt es eine wichtige Rolle, Marktchancen frühzeitig aufzuspüren und ihre technologische Leistungsfähigkeit und Ressourcen derartig auszurichten, dass ein entsprechendes Leistungsangebot innerhalb des richtigen Zeitraums am Markt platziert werden kann. Entsprechend wird „Roadmapping“, im Sinne des Beherrschens der Tätigkeiten, die zum Erstellen und Aktualisieren einer Roadmap gehören, als Rüstzeug im Repertoire des Technologiemanagers angesehen [MI17]. Es wundert folglich nicht, dass sowohl aus der unternehmerischen Praxis, als auch aus der Wissenschaft eine Vielzahl an Roadmaps hervorgegangen ist. Bereits vor 15 Jahren waren schätzungsweise etwa 900 Roadmaps öffentlich zugänglich [PFP09].

Verschiedentlich wurden Versuche unternommen, Roadmaps anhand geeigneter Merkmalskategorien zu klassifizieren. Während die Literatur ursprünglich zwischen übergreifenden (Branchen-)Roadmaps und Roadmaps von Einzelunternehmen für die interne strategische Planung unterschied [Mac06], wurde später u.a. nach dem Zweck des Roadmapping, dem Anwendungsbereich, dem inhaltlichen Schwerpunkt sowie dem Präsentationsformat der Ergebnisse klassifiziert [HTK17]. Auf diese Weise lassen sich bspw. Branchenroadmaps (z.B. die Halbleiter-Roadmap des Branchenverbands der U.S.- amerikanischen Halbleiterhersteller) [Sch07], von Wissenschafts- bzw. Technologie-Roadmaps (z.B. die Technology Roadmaps der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA) [Ker25] und Produktroadmaps von Einzelunternehmen (z.B. die Motorola Roadmap) [Wil87] abgrenzen.

Trotz der o.g. Versuche zur Systematisierung der Roadmaps, als auch zahlreicher präskriptiver Vorschläge zur Gestaltung des Roadmapping-Prozesses (u.a. [GB97, GVD09, BE06]), besteht die Notwendigkeit, die Roadmapping-Methode auf den jeweiligen Anwendungsfällen anzupassen. Kerr et al. weisen darauf hin, dass generische Roadmapping-Ansätze sich in der Vergangenheit bewährt haben, diese aber nur als Ausgangspunkt zu verstehen sind. Anpassungen sind sowohl in der Planungsphase (z.B. hinsichtlich des Ablaufs und der Roadmap-Struktur), als auch in der Durchführungsphase vorzunehmen [KPT19].

Des Weiteren lässt sich konstatieren, dass bei der Unterstützung der strategischen Planung die Anwendung des Roadmappings in privatwirtschaftlichen Unternehmen im Vordergrund zu stehen scheint, insbesondere von Großunternehmen [Ise17]. Andere Organisationsarten bzw. nicht-kommerzielle Wirtschaftszweige sind weniger repräsentiert [YWK09], was sich auch in Untersuchungen neueren Datums zeigt [SPW+22].

Im Fokus der vorliegenden Untersuchung soll insbesondere das Roadmapping von bzw. für Forschungseinrichtungen stehen. Dieser Typ von Organisation weist charakteristische Merkmale auf, die ihn von privatwirtschaftlichen Unternehmen unterscheiden, und die wiederum Einfluss auf das Roadmapping haben. Eine Forschungsorganisation ist einerseits mit den Herausforderungen konfrontiert, die typisch für o.g. Wissenschaftsroadmaps sind, bspw. hoher Un-

sicherheit hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen und langen Zeithorizonten. Andererseits verfolgt sie – analog zu den Produktroadmaps privatwirtschaftlicher Unternehmen – auch gewisse kurz-/mittelfristige kommerzielle Verwertungsabsichten und steht in einem Wettbewerb um finanzielle Ressourcen.

Aus diesem Spannungsfeld heraus wird im vorliegenden Beitrag anhand einer Fallstudie die Entwicklung von Roadmaps in Forschungsorganisationen am Beispiel eines Instituts der Fraunhofer-Gesellschaft im Bereich der Hochfrequenz- und Radartechnik beschrieben und analysiert. Im Zentrum des Erkenntnisinteresses sollen zwei Fragen stehen:

- Mit welchen Besonderheiten ist zu rechnen, wenn Roadmapping aus der Perspektive einer Forschungsorganisationen zum Zweck der eigenen strategischen (Technologie-)Planung eingesetzt wird
- Welche Modifikationen sind hinsichtlich des Roadmapping-Prozesses notwendig und welche Gestaltungshinweise lassen sich daraus ableiten?

2 Literaturübersicht und theoretische Grundlage

2.1 Zum Stand der strategischen Technologieplanung mit Roadmaps durch bzw. für Forschungsorganisationen

entwickelte sich seitdem zu einem der am häufigsten verwendeten Instrumente im F&E-, Technologie- und Innovationsmanagement. Roadmaps können verschiedene Formen annehmen und unterschiedliche Zwecke erfüllen. Die grundlegende Architektur folgt jedoch einem einheitlichen Prinzip: der Integration verschiedener Perspektiven in einer chronologisch sortierten, grafischen Darstellung. Nach Phaal et al. [PFP09] kann Roadmapping als ein strategisches Planungsverfahren verstanden werden, das darauf abzielt, die Evolution und Verknüpfung verschiedener Planungsebenen zu visualisieren. Typischerweise wird die Entwicklung von Märkten, Produkten und Technologien bis zu einem gewissen Zeithorizont betrachtet. Diese Planungsebenen können je nach Bedarf ergänzt oder angepasst werden.

Analog zur Nutzung von Roadmaps in Industrieunternehmen wurde vermehrt auch in der Wissenschaft die Frage gestellt, welche Voraussetzungen erfüllt und welche Forschungsfragen beantwortet werden müssen, um bestimmte wissenschaftliche Ziele zu erreichen. Unter dem Stichwort des „Science Roadmapping“ [Gal98] bzw. „Science and Technology (S&T) Roadmapping“ [KS01], ließen sich zunächst in den USA Planungsinitiativen beobachten, bei denen Forschungsorganisationen mitwirkten [MDH+02]. Die Europäische Kommission versuchte Anfang/Mitte der 2000er Jahre mit Hilfe der Erstellung von Forschungsroadmaps dem Risiko steigender Fragmentierung und fehlender Synergien in der Forschungsförderung entgegenzuwirken. Aus diesen Vorhaben sind entsprechende „Lessons Learned“ [TE17], als auch formalisierte Roadmapping-Ansätze hervorgegangen [CA04]. Yasunaga et al. berichten von ähnlichen, forschungspolitisch motivierten Initiativen in Japan, die vom Ministerium für Wirtschaft und Industrie (METI) in Zusammenarbeit mit Forschungs- und Industriepartnern in Gang gesetzt wurden. Ziel war es, die Langfristigplanung von akademischen Organisationen mit der kurz- und Mittelfristplanung von Unternehmen zusammenzuführen [YWK09].

Dass Forschungsorganisationen in Initiativen zur Forschungsplanung involviert sind, die sich des Roadmapping bedienen, ist also nicht neu. Weitaus seltener dokumentiert ist hingegen, wie Forschungsorganisationen Roadmaps für ihre eigene strategische Planung einsetzen. Zwar konstatierten Geffen und Judd bereits vor 20 Jahren, dass Forschungsorganisationen vermehrt auf Methoden und Instrumente der strategischen Technologieplanung zurückgreifen, wie sie in privatwirtschaftlichen Unternehmen zu finden sind – u.a. auf das Roadmapping – jedoch vertiefen sie das Thema nicht [GJ04].

Nach Kenntnis der Autoren existieren bislang keine Breitenuntersuchungen zu dieser Fragestellung, wohl aber lassen sich einzelne dokumentierte Fälle finden:

Okutsu und Tatuse schildern Anfang der 2000er Jahre das Konzept der „Academic Technology Roadmap“, eines (aus heutiger Sicht) noch recht rudimentären Roadmap-Gerüsts, mit dessen Hilfe japanische Forschungslaboratorien in einen strukturierten Dialog mit ihren Stakeholdern treten konnten, um sich hinsichtlich der zukünftigen Forschungsbedarfe auszutauschen [OT-01].

- Caetano und Amaral schlagen einen modifizierten Technologie-Roadmapping Ansatz vor, der speziell für high-tech KMU und „Research Center“ geeignet sein soll, da diese im Sinne eines „technology push“ in der Regel keine Produkte, sondern Technologien entwickeln und für deren Kommerzialisierung auf Partnerorganisationen zurückgreifen müssen [CA11]. Ihr Roadmapping Konzept namens Market Technology Push (MTP) legt daher besonderen Wert auf die frühzeitige Identifikation von Märkten und Anwendungen für eine Technologie sowie die Suche nach geeigneten Partnerorganisationen (Investoren, Technologielieferanten usw.)
- Loyarte et al. untersuchen den Prozess der erstmaligen Erstellung einer strategischen Roadmap für eine Forschungsorganisation, die im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien tätig ist [LPG+15]. Sie legen dar, wie für die Gesamtorganisation eine Roadmap entworfen wurde. Im Laufe des Vorhabens greifen sie auf das Roadmapping-Konzept von Phaal zurück [PFP01] und ergänzen es mit weiteren strategischen Planungsmethoden wie (z.B. Technologie-Portfolios).
- Osborne et al. beschreiben den Versuch, die Roadmaps von sieben britischen, regional tätigen Forschungszentren („Research & Technology Organizations“ [RTOs]) zusammenzuführen, um sie besser auf industrielle Bedarfe abzustimmen [ORI21]. Im Laufe der Initiative konnten die Bedarfe von sechs Branchen (Luftfahrt, Automobil, Bau etc.) mit sieben Forschungs- bzw. Technologiefeldern (Automatisierung, Elektronik, Messtechnik etc.) verknüpft werden. Die Einzelroadmaps orientieren sich ebenfalls an dem Roadmapping-Konzept von Phaal [PFP01].

Es ist ferner festzuhalten, dass Forschungsorganisationen keine homogene Kategorie von Organisationen darstellen, sondern bereits in sich ein breites Spektrum von Organisationsformen beinhalten. Das Frascati Manual der OECD [OEC02] unterscheidet vier Typen von Organisationen, die Forschung betreiben:

- Staatliche Organisationen und öffentliche Einrichtungen
- Einrichtungen für höhere Bildung (insb. Hochschulen)
- Privatwirtschaftliche Unternehmen
- Private Non-Profit-Organisationen

Die OECD führt die Bezeichnung „Public Research Institutions“ (PRI) ein, um die Entwicklungen speziell im Bereich der (halb-)öffentlichen Forschungseinrichtungen näher zu beleuchten, welche Universitäten explizit nicht einbeziehen. Für Deutschland zählt Sie dazu u.a. die Fraunhofer Gesellschaft, die Helmholtz-Forschungszentren, die Max-Planck-Gesellschaft und die Leibniz-Gemeinschaft [OEC11]. Eine ähnliche Unterscheidung treffen Cruz-Castro und Sanz-Menendez, die aus dem sogenannten „Public Research Sector“ (PRS), der alle Forschungseinrichtungen einschließt (inklusive Universitäten), die „Public Research Organisations“ (PRO) hervorheben [CS18]. Dieses Verständnis von PRI bzw. PRO soll als grobe Einordnung von Forschungsorganisationen dem vorliegenden Beitrag zu Grunde liegen.

2.2 Eigenschaften von Forschungsorganisationen mit Einfluss auf die Technologieplanung

Um die spezifischen Herausforderungen der strategischen Technologieplanung für Forschungsorganisationen zu verstehen, ist es notwendig, ihre „Funktionsweise“ zu verstehen. Auf Basis der Sichtung einschlägiger Literatur können vier Spannungsfelder identifiziert werden, die in diesem Kontext für Forschungsorganisationen relevant sind.

Finanzierungsstrukturen und Stakeholder-Komplexität

Die Finanzierung von Forschungsorganisationen erfolgt typischerweise über multiple Kanäle: Sie kann Grundfinanzierung, Drittmittelforschung, öffentliche Förderung und private Kooperationen einschließen. Die Art der Finanzierung hat Einfluss auf das Setzen von Zielen und die Forschungsagenda [CS18]. Speziell wenn die Mittelverwendung an Forschungsprogramme geknüpft, bspw. durch Mittelvergabe in öffentlichen Ausschreibungen, oder Mittel in direktem Auftrag erteilt werden, nehmen externe Organisationen direkt und indirekt Einfluss auf die Ziele der Organisation. Da die Finanzierungsstruktur in der Regel gemischt ist, haben Forschungsorganisationen es häufig mit komplexen Stakeholder-Konstellationen zu tun, die unterschiedliche Erwartungen aufweisen.

Organisatorische Strukturen: Zentrale vs. dezentrale Governance

Forschungsfreiheit und Autonomie spielen in Forschungsorganisationen eine weniger starke Rolle als in Universitäten. Häufig ist die Leitung der Organisation nicht mehr direkt im Forschungsbetrieb involviert. Zudem existiert eine Verwaltung, die administrative Tätigkeiten wahrnimmt und in gewissem Rahmen auch für planerische Tätigkeiten und Controlling zuständig ist. Das Vorhandensein von Hierarchien und eine gewisse funktionale Spezialisierung ermöglichen eine Ausrichtung der Organisation auf die Erreichung spezifischer Ziele, auch finanzieller Art. Gleichzeitig weisen Forschungsorganisationen zu einem gewissen Grad dezentrale Entscheidungsstrukturen auf, die auch hinsichtlich ihrer langfristigen Ausrichtung von Bedeutung sind. Abteilungs- und Gruppenleitenden wird eine gewisse strategische Autonomie und

Einfluss auf die Setzung von Forschungsschwerpunkten zugebilligt, da sie als Experten in ihrem Tätigkeitsbereich fungieren.

Eingeschränkte Planbarkeit und Umgang mit Unsicherheit

Forschungsarbeit ist auf verschiedenen Ebenen inhärent mit Unsicherheit verbunden. Auf der individuellen Ebene betrifft dies die eingeschränkte Vorhersehbarkeit der Forschungsergebnisse, aber auch die Unsicherheit hinsichtlich der Forschungsfinanzierung, Anschluss-Arbeitsverträgen und Karriereentwicklung. Trotz (oder gerade wegen dieser Unsicherheit) sind Systeme zur Messung, Bewertung und Verwaltung der Leistung von Forschenden sowie die Förderung wettbewerblicher Dynamiken mittlerweile in der Organisation von Forschungsarbeit verankert, bspw. durch die Erhebung der Publikationshäufigkeit, Erwartungen hinsichtlich der Einwerbung von Drittmitteln usw. Von Geldgebern wird erwartet, dass Forschende und Forschungsorganisationen den Fortgang ihrer wissenschaftlichen Arbeit in einem bestimmten Zeitrahmen zuverlässig vorhersagen können [FS18].

Zeithorizonte und Entwicklungszyklen

Forschungsorganisationen operieren tendenziell mit deutlich längeren Zeithorizonten als privatwirtschaftliche Unternehmen. So weisen Roadmaps in der Wissenschaft mitunter einen Zeithorizont von 20 Jahren und mehr auf [YWK09]. Grundlagenforschung kann Jahrzehnte bis zur praktischen Anwendung benötigen, aber auch in der angewandten Forschung können Entwicklungszyklen – je nach betrachteter Domäne – sich über viele Jahre ziehen. Gleichzeitig kann es sein, dass sehr kurzfristige Drittmittelprojekte bedient werden müssen. Die Langfristigkeit, als auch die Mehrstufigkeit der Zeithorizonte sollte in Planungsprozessen berücksichtigt werden.

3 Methodisches Vorgehen

3.1 Auswahl der Forschungsmethode

Fallstudien gelten als die Hauptforschungsmethode im Bereich des Roadmappings, insbesondere wenn es um deren Entwicklung und Implementierung geht, d.h. die Ausgestaltung der Phasen, Aktivitäten und Erfolgsfaktoren bei der Implementierung [DF23]. Sie eignen sich besonders dann als Untersuchungsansatz, wenn komplexe, qualitativ zu beschreibende Phänomene in ihrem Kontext untersucht werden sollen. Da es in diesem Beitrag darum geht, die Rahmenbedingungen für erfolgreiches Roadmapping in einem bestimmten organisationalen Setting zu verstehen, bietet sich dieser Forschungsansatz an. Die Analyse der Daten beruht auf den Ergebnissen der Roadmapping Workshops, der Erhebung von Feedback im Anschluss an die Erstellung der drei Pilot-Roadmaps durch die Workshop-Teilnehmer, sowie einem zusätzlichen, gemeinsamen Lessons-Learned-Workshop mit den jeweiligen Roadmap-Verantwortlichen. Zudem wurde etwa ein dreiviertel Jahr nach Erstellung der Roadmaps ein Feedback-Gespräch mit dem verantwortlichen Projektleiter ‚Wissenschaftliches Roadmapping‘ geführt.

3.2 Beschreibung der Fallstudie & Ablauf der Roadmapping-Initiative

Die in der Fallstudie betrachtete Forschungsorganisation ist ein Institut, das angewandte Forschung und Entwicklung im Bereich der Hochfrequenz- und Radartechnik betreibt. Fast 400 Mitarbeitende entwickeln Konzepte, Verfahren und Systeme für elektromagnetische Sensorik vom Mikrowellen- bis in den unteren Terahertz-Bereich, die u.a. für Aufklärung, Überwachung und Schutz bis hin zu echtzeitfähigen Sensoren für Verkehr und Navigation eingesetzt werden.

Durch ein starkes Wachstum und die damit verbundene Verdoppelung der Mitarbeiterzahl in den zurückliegenden 15 Jahren konnten die Planungsprozesse nach Einschätzung von Institutsvertretern mit dem personellen Wachstum nicht Schritt halten. Damit einhergegangen war eine starke inhaltliche Entkopplung der Planungsprozesse von Institutsbereichen. Hierdurch kam es zu Ineffizienzen wie redundanten Strukturen und Doppelarbeit. Nach einer Reorganisation des Instituts, verbunden mit einer stärker marktorientierten Ausrichtung, wurde die Entscheidung getroffen, Roadmaps als ein Kerninstrument zur Technologieplanung einzuführen. Die Roadmapping-Methode sollte anhand von „Pilot-Roadmaps“ zunächst getestet und im Erfolgsfall weiter ausgerollt werden. Insgesamt erhoffte sich das Institut von den Roadmaps a) eine höhere Transparenz hinsichtlich der Ausrichtung des Instituts, b) eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und c) letztlich einen Beitrag zur finanziellen Stabilität der Organisation.

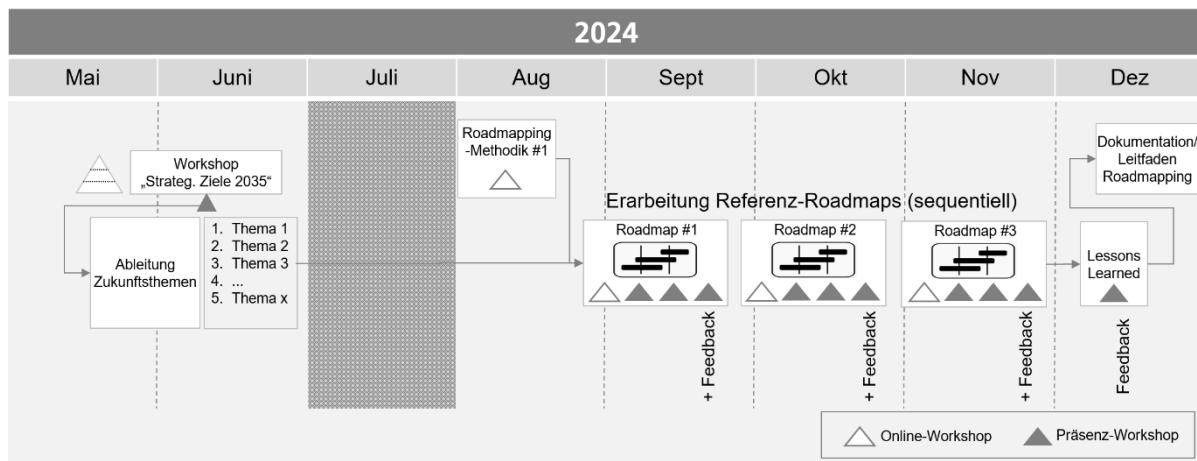


Bild 1: Zeitplan für die Durchführung Roadmapping Initiative

Ein Schwerpunkt der Pilot-Roadmaps sollte insbesondere darauf liegen, ambitionierte Zukunftsthemen zu planen, die eine bereichsübergreifende Zusammenarbeit erfordern. Jeder der drei Hauptforschungsbereiche sollte an der Pilotierung beteiligt sein. Um die vielversprechendsten Zukunftsthemen zu identifizieren, wurden im Juni 2024 in einem Workshop ca. 30 mögliche Zukunftsthemen präsentiert und bewertet. Von allen Vorschlägen kamen sieben in die engere Auswahl, drei wurden letztlich ausgewählt um per Roadmap ausgeplant zu werden. Für diese drei Vorhaben wurden Verantwortliche benannt, der Aufwand zur Erarbeitung geschätzt und eine Reihenfolge zur Bearbeitung bestimmt. Die Erstellung der Roadmaps war für die zweite Jahreshälfte 2024 anvisiert (Bild 1).

3.3 Vorüberlegungen zur Auswahl des Roadmapping-Verfahrens

Die ersten operativen Schritte im Roadmapping bestehen aus der Vorbereitung und Planung der Roadmapping-Aktivitäten. Bevor eine für den jeweiligen Anwendungsfall angemessene Vorgehensweise ausgewählt werden kann, empfiehlt Isenmann die Beantwortung von drei Leitfragen, die den Roadmapping-Zweck, die verfügbaren Ressourcen sowie die zu behandelnden Inhalte adressieren [Ise17] (Tabelle 1). Anhand dieser Randbedingungen kann die Menge in Frage kommender Verfahren eingegrenzt werden.

Da am Institut kein eigenes Know-how zum Roadmapping vorhanden war, wurden zwei Mitarbeitende eines weiteren Forschungsinstituts mit der Planung und Durchführung der Roadmapping-Workshops beauftragt. Hierzu gehörte auch die Auswahl eines geeigneten Roadmapping-Verfahrens.

Tabelle 1: Leitfrage zur Auswahl eines geeigneten Roadmapping-Verfahrens

Was ist der Zweck der Roadmap-Erstellung? Welche Ziele sollen erreicht werden?	Welche Ressourcen (Zeit, Expertise, Finanzielle Mittel) stehen zur Verfügung?	Welche Inhalte / Problem- / Themenfelder werden betrachtet?
<ul style="list-style-type: none"> - Etablierung von Roadmapping als transparente Planungsmethodik - Förderung der bereichsübergreifenden Zusammenarbeit und Nutzung gemeinsamer Ressourcen - Erlernen des Roadmapping zur selbständigen Anwendung in den Fachbereichen/-abteilungen - Zunächst interne Nutzung der Roadmaps (ggf. Teilen von Informationen mit Dritten zu einem späteren Zeitpunkt) 	<ul style="list-style-type: none"> - Erarbeitung von drei Roadmaps im Laufe von etwa drei/vier Monaten - Zeit pro Roadmap ca. 4-5 Wochen - Die Roadmapping-Teams beinhalten ca. 6-10 Personen aus den drei Fachbereichen; aus einem Bereich können mehrere Fachabteilungen involviert sein. - Externe Moderatoren unterstützen bei Planung und Durchführung - Die Teams könnten überwiegend auf intern vorhandene Daten zugreifen - Nicht alle Personen in den Roadmapping-Teams kennen sich bereits. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ausarbeitung von drei hoch priorisierten Zukunftsthemen (u.a. Space-based Radar) - Die Themenfelder sind teils neu, teils existieren dazu schon Vorarbeiten. - Die Themenfelder erfordern die Zusammenarbeit der drei Fachbereiche, sie beinhalten bspw. sowohl Hardware wie Software-Themen

Die Auswahl des grundlegenden Roadmapping-Verfahrens orientierte sich zunächst an der prinzipiellen Eignung für den Organisationstyp „Forschungsorganisation“. Hauptbetätigungs-feld dieser Organisationen ist selbstredend Forschung & Entwicklung. Dementsprechend kamen Roadmappingansätze in Frage, die eher F&E-zentrisch sind und die Technologieentwick-lung in den Vordergrund stellen. Unter dieser Denkschule lassen sich Konzepte wie die Advanced Technology Roadmapping Architecture (ATRA) von de Weck [Wec22]), der Technology Roadmapping Process von Garcia und Bray [GB97] oder der Roadmapping Prozess von McCarthy et al. [MHD01] subsumieren. Ihnen ist gemeinsam, dass sie auf das Finden der best-möglichen technologischen Lösung eines komplexen Problems fokussieren. Als Alternative kamen diejenigen Ansätze in Frage, die eher aus dem privatwirtschaftlichen Bereich stammen und die funktionsübergreifende Ausrichtung auf die Unternehmensziele in den Vordergrund stellen. Da Forschungsorganisationen letztlich mit ähnlichen Herausforderungen wie kommerzielle Unternehmen zu tun haben, lassen sich auch hierfür Argumente finden. Stellvertretend für die Vielzahl an Ansätzen seien die Roadmapping-Vorgehensweisen des Instituts for Manufacturing der Universität Cambridge genannt („T-Plan“ und „S-Plan“), die in ihrer Grundform die drei konzeptionellen Roadmap-Ebenen Markt, Produkt und Technologie in Einklang zu bringen ver suchen.

Unter Berücksichtigung der Antworten zu den Leitfragen, fiel die Wahl nach Rücksprache mit dem Auftraggeber letztlich auf die „Fast-Start“ T-Plan-Vorgehensweise [PFP01]. Diese Vorgehensweise

- ist bereits in Forschungsorganisationen zum Einsatz gekommen und scheint für entsprechende Themenfelder eine gewisse Eignung aufzuweisen (siehe Kap. 2.1),
- generiert eine Roadmap in wenigen, aufeinander aufbauenden Workshops, mit einem zeitlichen und personellen Aufwand, der den Vorstellungen der Institutsleitung entspricht (siehe Tabelle 1),
- verfolgt einen cross-funktionalen, konsensorientierten Ansatz, wie er ebenfalls von der Institutsleitung gefordert wurde.

Die S-Plan-Vorgehensweise ist gegenüber dem T-Plan der weiter gefasste Roadmapping-Ansatz, da er auch die Identifikation neuer Geschäftsideen („Opportunities“) berücksichtigt. Dieser Schritt hatte durch die Auswahl von Zukunftsthemen jedoch bereits stattgefunden, so dass der fokussiertere T-Plan passend erschien.

4 Fallstudie: Anwendung des Roadmapping

4.1 Kurzübersicht zum Ablauf des Roadmapping-Prozesses

Im Anschluss an die Auswahl des Roadmapping-Verfahrens waren die Roadmapping-Aktivitäten im Detail zu planen. Die externen Moderatoren des Roadmapping-Prozesses koordinierten gemeinsam mit dem Projektleiter ‚Wissenschaftliches Roadmapping‘ des Institutes im Anschluss den Fortgang des Projekts. Für jede Pilot-Roadmap wurden zwei „Kümmerer“ definiert, die einerseits als Ansprechpartner für die Moderatoren und dem Projektleiter zur Verfügung standen, andererseits ein Roadmap-Team zusammenstellten, welches Teilnehmer aus den verschiedenen Institutsbereichen umfasste.

Insgesamt beinhaltete die Roadmapping-Initiative die Durchführung von vierzehn Workshops:

- Zu Beginn einen allgemeinen zweistündigen Online-Workshop zur Vermittlung der Roadmap-Methodik (für alle Roadmap-Kümmerer, das Project Management Office und den Projektleiter),
- anschließend für jede der Pilot-Roadmaps ein Planungstreffen (1,5h, nur die Roadmap-Kümmerer) sowie drei Roadmapping-Workshops zur Roadmap-Erstellung (je $\frac{1}{2}$ Tag, inkl. dem gesamten Roadmapping-Team), sowie
- einen „Lessons-Learned“-Workshop (2h, mit allen Roadmap-Kümmerern und dem Projektleiter), um die Erfahrungen aus den drei Pilot-Roadmaps zu konsolidieren und die weitergehende Implementierung vorzubereiten.

Die Roadmapping-Teams umfassten jeweils ca. sechs bis zehn Mitarbeiter.

Die drei Roadmaps konnten auf diese Weise innerhalb des geplanten Zeitraums erstellt werden. In den Roadmaps fanden sich zwischen 70-90 einzelne Roadmap-Themen bzw. -Elemente, die auf drei bzw. vier Ebenen dargestellt wurden. Beispielhaft sei die Entstehung einer der drei

Roadmaps für das Thema „Space-based Radar 2025 - 2035“ illustriert (Bld 2). Aus ihr lässt sich ablesen, wie Themen zunächst identifiziert und lose den vier Roadmap-Ebenen a) Markt, b) Produkte & Dienstleistungen, c) Kompetenzen/Ressourcen und d) Technologien zugeordnet wurden. Im darauffolgenden Workshop wurden weitere Roadmap-Elemente hinzugefügt und in eine passende chronologische Reihenfolge gebracht. Im dritten und letzten Workshop wurden die Elemente miteinander verbunden, so dass sich ein schlüssiges Roadmap-Narrativ ergab.



Bild 2: Evolution der Roadmap „Space-based Radar“ entlang der Workshops

5 Erkenntnisse und Gestaltungshinweise für erfolgreiches Roadmapping in Forschungsorganisationen

Nachfolgend sollen die Erkenntnisse aus der Anwendung des Roadmapping-Prozesses wiedergegeben werden. Im Vordergrund stehen die Herausforderungen, die sich bei der Vorbereitung sowie bei der Durchführung ergeben haben, sowie die Lösungsansätze, um diesen Herausforderungen zu begegnen.

Um die Roadmapping-Initiative auf die jeweiligen Bedürfnisse anzupassen und zu strukturieren, ist es sinnvoll, in Makro-Prozesse und Mikro-Prozesse zu unterscheiden [PFP04]. Erstere beschreiben die Gestaltung des übergeordneten Ablaufs der Workshops (u.a. die Planung der Anzahl und Themenstellungen der Workshops), letztere die Vorgehensweisen, die innerhalb eines Workshops zur Anwendung kommen (Moderationstechniken, Entscheidungsheuristiken o.ä.). Auch soll auf die visuelle Gestaltung der Roadmap selbst (Struktur, Detaillierungsgrad etc.) im Workshop eingegangen werden.

5.1 Anpassungen auf Ebene der Makro-Prozesse

In der simpelsten Form des T-Plan empfehlen Phaal et al. einen dreistufigen Prozess zur Roadmap-Erstellung, der sich in seiner einfachsten Form aus der Planung, der eigentlichen Roadmaperstellung (über ein oder mehrere Workshops) sowie einem „Post-Workshop-Meeting“ zusammensetzt.

Für jede der drei Roadmaps wurde zunächst ein Planungstreffen angesetzt, in dem sich die designierten Moderatoren mit den Roadmapverantwortlichen hinsichtlich der Durchführung der geplanten Workshops abstimmten. Die Inhalte eines solchen Treffens betreffen u.a. die Vermittlung der Grundzüge des Roadmapping, die Auswahl der Teilnehmer, die zeitliche und

grobe inhaltliche Planung, aber auch das Setzen erster Arbeitsdefinitionen, wie z.B. des zeitlichen Horizonts und der Anzahl der zu betrachtenden Roadmap-Ebenen.

Hervorzuheben im Sinne der Notwendigkeit der Anpassung der Abläufe war die Befürchtung der Roadmap-Kümmerer, dass es nicht ausreichend belastbare Informationen zur Beschreibung der „Markt“-Ebene gäbe. Dies lag zum einen an der Natur der Roadmap-Themen, denn es handelte sich um Zukunftsthemen mit noch vagen Vorstellungen hinsichtlich einer erfolgreichen Kommerzialisierung. Zum anderen verstand sich die Mehrheit der Teilnehmer, wenig überraschend für ein Forschungsinstitut, als Wissenschaftler und Technologie-Entwickler. Marktgerichtete Tätigkeiten lagen weitgehend im Verantwortungsbereich der einzelnen Fachabteilungen, wurden aber eher stiefmütterlich verfolgt. Aus diesem Grund wurden auf Ebene der Makro-Prozess zwei Modifikationen vorgenommen:

Einführung zusätzlicher Phasen zur Informationssammlung

Jedem der drei Roadmapping-Workshops wurden Phasen vorangestellt, in der „Hausaufgaben“ zu erledigen waren (Bild 3). Diese Hausaufgaben dienten der Informationssammlung, insbesondere zur Vorbereitung des ersten Workshops, aber auch zur Klärung offener Themen, die für den jeweils folgenden Workshop nachzurecherchieren waren. Um die Informationssammlung zu vereinfachen, wurden den Teilnehmern entsprechende Vorlagen mit Arbeitsanweisungen zugänglich gemacht. Es lag in der Verantwortung der Roadmap-Kümmerer, die Inhalte von ihrem Roadmap-Team abzufragen und diese vorzusortieren. Analog dazu wurden nach jedem Workshop diejenigen Themen nachrecherchiert, die während des Workshops nicht gelöst werden können.

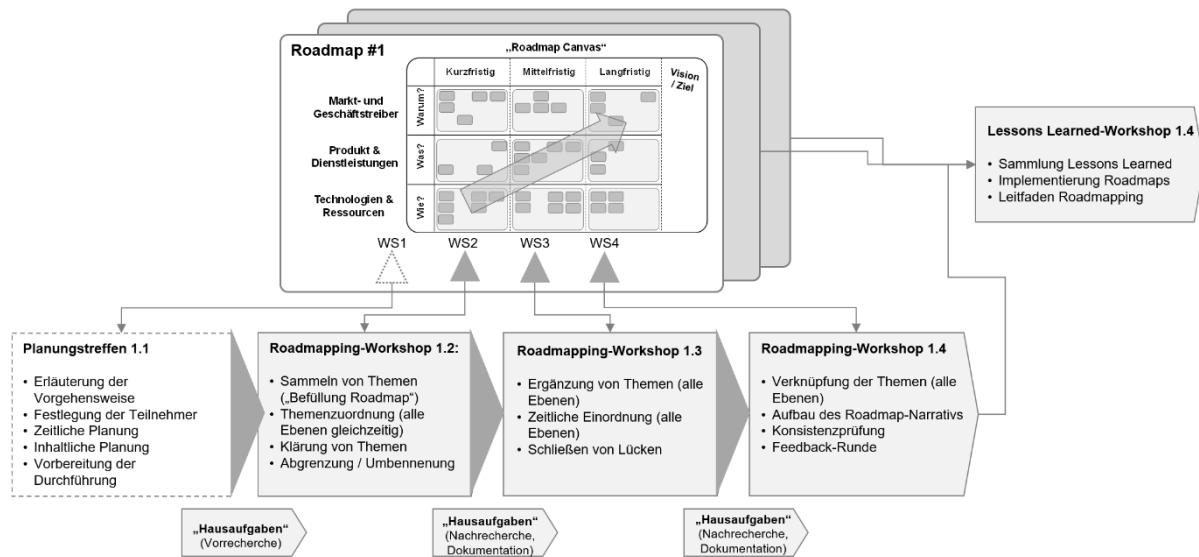


Bild 3 Übersicht (adaptierte) Vorgehensweise Roadmapping

Veränderte Reihenfolge der Bearbeitung der Roadmap-Ebenen

Während bei der T-Plan Methode die Ebenen i.d.R. sequentiell durchlaufen werden (meist ein Workshop pro Ebene [Markt, Produkt, Technologie], angefangen mit der Markt-Ebene), wurden nun alle Ebenen gleichzeitig in allen drei Workshops behandelt. Der erste Workshop diente

dem Sammeln und Verstehen der Themen, der zweite der zeitlichen Zuordnung auf der Zeitleiste, der dritte zur Verknüpfung der Themen und Erstellung des Narrativs.

Hinsichtlich der grundlegenden Roadmap-Architektur gab es nur wenige Abweichungen von dem generischen T-Plan. So wurde die grundlegende Struktur und Aufteilung der Roadmap in die Hauptebenen „Markt“, „Produkt“ und „Technologie“ weitgehend beibehalten, einmal wurde noch zwischen „Technologie“ und „Kompetenzen/Ressourcen“ differenziert.

Hinsichtlich des Zeithorizonts bildeten zwei der Roadmaps jeweils einen Zeitraum von fünf Jahren ab, eine Roadmap war auf zehn Jahre angelegt. Es zeigte sich, dass die Planungshorizonte, je nach Thema, aber auch nach anvisierter Kundengruppe, sehr unterschiedlich sein können. Für Kunden aus dem Verteidigungsbereich waren längere Entwicklungszyklen nichts ungewöhnliches, Kunden in zivilen Branchen verlangten nach schnelleren, anwendungsnahen Lösungen.

5.2 Anpassungen auf Ebene der Mikro-Prozesse

Anpassungen auf Ebene der Mikro-Prozesse beziehen sich auf die Veränderungen, die innerhalb der Abfolge der einzelnen Aktivitäten in den Workshops vorzunehmen waren. Diese lassen sich wie folgt beschreiben:

„Befüllung“ der Roadmap: Zeitbedarf für Schaffung eines einheitlichen Wissensstandes / Gegenseitiger Austausch

Auffällig im ersten Roadmapping-Workshop, der der Sammlung der Einzelthemen auf dem „Roadmap-Canvas“ diente, war zunächst der schiere Zeitbedarf, der notwendig war, um ein gemeinsames, geteiltes Verständnis für die per Hausaufgaben gesammelten Einzelthemen herzustellen. Obwohl die „Hausaufgaben“ von jedem Teilnehmer eingesehen werden konnten und zu Beginn ein Zeitfenster vorgesehen war, die Einzelthemen vorzustellen und offene Fragen zu klären, war noch viel Abstimmungsarbeit zu leisten (Verständnisfragen, Benennung / Abgrenzung von Themen, ...). Dieser Austausch stellte sich als gut investierte Zeit heraus, denn die Teilnehmer waren in ihrem Fachgebiet stark spezialisiert und nicht notwendigerweise mit der Perspektive ihrer (teils bereichsfremden) Kollegen vertraut. Hinzu kam, dass sich aufgrund der Größe der Organisation und der Arbeit an zwei (benachbarten) Standorten, die Teilnehmer teilweise nicht persönlich kannten.

Zuordnung der Einzelthemen zu den Roadmap-Ebenen: Klärung von Begrifflichkeiten / Vermeidung von Unschärfen auf Produktebene

Im Laufe des ersten Roadmapping-Workshops zeigte sich, dass sich das Team mit der Befüllung der Produkt-Ebene schwertat und Missverständnisse die Folge waren. Unter anderem traten folgende Probleme zu Tage:

- Häufig werden keine Produkte (im Sinne von Sachgütern) kommerzialisiert, sondern Dienstleistungen wie Konzeptentwicklungen, Machbarkeitsstudien o.ä. In den Vorlagen zur Informationssammlung war nicht eindeutig geklärt, inwieweit immaterielle Leistungen als ein verwertbares Gut gelten.

- Das Institut vermarktet meist keine marktfähigen, „schlüsselfertigen“ Produkte. Die Produkte sind eher als Technologien mit einem gewissen Reifegrad zu verstehen, die häufig noch nicht „ausentwickelt“ sind, aber reif genug, um von den Kunden aufgegriffen zu werden.
- Häufig war nicht klar, ob von dem Produkt des Forschungsinstituts oder von dem (End-)Produkt des Kunden die Rede ist, z.B. ein Radarsystem, welches auf einer Drohne eingesetzt wird.

Es war für die Autoren nicht abschließend zu klären, ob diese Unschärpen besonders in Forschungsorganisationen registriert werden können, z.B. weil ein gewisser Geschäftsjargon (im Sinne eines „business speak“), den Technologieentwicklern eher fremd ist, oder ob dies eine allgemeine Verbesserungsmöglichkeit für das T-Plan-Verfahren darstellt, denn in seiner Grundform geht das Verfahren eher von klassischen produzierenden Unternehmen aus.

Die Lösung lag in einer eindeutigeren Definition der Ebenen. Als Produkt wurde etwas definiert, was zumindest einen „Demonstrator“-Charakter aufweisen konnte. Auch Dienstleistungen bzw. Software galten, obwohl immateriell, als Produkt. Die Moderatoren waren dazu angehalten, diese Definitionen den Teilnehmern immer wieder ins Gedächtnis zu rufen.

Zeitliche Einordnung der Einzelthemen: Schwierigkeiten bei der Zuordnung der Marktelemente / Eingrenzung der Marktsicht

Schwierigkeiten ergaben sich ebenso bei der zeitlichen Einordnung der Einzelthemen auf der Marktebene. Wie im vorangehenden Kapitel erläutert, mag dies für eine Forschungsorganisation generell eine spezielle Herausforderung darstellen, wenn zwar eine gewisse technologische Weitsicht vorhanden ist, aber Informationen auf der Marktebene fehlen. Insgesamt fiel es den Team-Mitgliedern schwer, zukünftige Entwicklungen zu antizipieren und mit einem gewissen Vertrauen in das eigene Urteilsvermögen auf dem „Roadmap-Canvas“ zu verorten.

- **Mangel an eindeutigen Marktanforderungen / Quantifizierung der Marktnachfrage:** Die Nachfrage auf der Marktseite ist häufig nicht explizit vorhanden ist, speziell wenn es um innovative Themen geht, die einen starken „Technologie-Push“-Charakter aufweisen. So existieren mitunter schlichtweg keine definierten Anforderungen (z.B. das Auflösungsvermögen eines Radars) von Kundenseite oder externe Branchenroadmaps, die zur Orientierung herangezogen werden können. Gleichzeitig ist aber auch nicht möglich, jahrelang ohne Input von Seiten des Kunden ein Produkt zu entwickeln. Stattdessen konkretisiert sich die Nachfrage in einem wechselseitigen Prozess mit dem potenziellen Kunden. Dieser kann sich über Jahre hinweg ziehen, und reicht von der ersten Idee und Machbarkeitsprüfung, über den Aufbau von Beratungsfähigkeit seitens des Instituts, die Analyse von Anforderungen, bis zur Entwicklung und dem Test des Produkts. In der Roadmap führte dies zu einer Art „Ping-Pong“ zwischen der Markt- und den untergeordneten Ebenen, bis das fertige Produkt kommerzialisiert war.
- **Differenzierung der Marktanforderungen / Marktnachfrage:** Der gegenteilige Fall ist in einem Forschungskontext aber ebenfalls denkbar. Für eine Roadmap, die im Bereich der Künstlichen Intelligenz angesiedelt war, wurden ausgesprochen viele, wenn auch recht vage Anwendungsfelder in diversen Branchen genannt. An dieser Stelle gelangte auch die Darstellung im Workshop mittels Pinwänden, Brown-Paper und Post-its an ihre physischen

Grenzen, da die schiere Anzahl an Verknüpfungen schwer sichtbar gemacht werden konnten, ohne bei der Übersichtlichkeit Abstriche zu machen.

- **Mangel an weiteren Ankerpunkten:** Zu guter Letzt erwies es sich als nicht-triviale Aufgabe, Ankerpunkte in der Markt-Ebene zu setzen. So war es bspw. für die Roadmap im Bereich „Künstliche Intelligenz“ absehbar war, dass es in näherer Zukunft Gesetzgebungsinitiativen geben würde, die die Nutzung derselben in gewissem Maße regulieren würde. Es benötigte aber noch viel zusätzlicher Recherche, um diese zeitlich halbwegs verlässlich einzuordnen.

Konsistenzprüfung: Umgang mit Unsicherheiten und Realisierbarkeit der Roadmap

Gegen Ende der Fertigstellung der Roadmap, nachdem die Verknüpfungen abgeschlossen waren, stellte sich in der Rückschau die Frage nach der Realisierbarkeit dessen, was auf der Roadmap abgebildet war. Ein Teilnehmer (eine Führungskraft) konstatierte, dass zwar die Roadmap-Elemente logisch aufeinander aufbauten, er aber gar nicht über das Personal bzw. die entsprechenden Projektmittel verfüge, um die Aktivitäten in der gewünschten Zeit abzuarbeiten. Anders als in privatwirtschaftlichen Unternehmen schien die Realisierbarkeit der Aktivitäten nicht nur eine Frage von Budgetallokation zu sein, sondern auch mit der Fähigkeit zusammenzuhängen, im Anschluss entsprechende (externe) Mittel einzuwerben und qualifizierte Mitarbeiter einzustellen.

Im vorliegenden Fall wurde vereinbart, dass den Roadmaps die Prämisse zugrunde lag, dass die geplanten Aktivitäten im Optimalfall so ablaufen würden. Dies würde implizieren, dass mit einer ausreichend hohen Wahrscheinlichkeit tatsächlich entsprechende Projekte akquiriert und Personal eingestellt werden könnte. Eine gänzlich unrealistische Planung sollte selbstredend vermieden werden.

Implementierung der Roadmap: Erwartungshaltungen der Roadmap-Teilnehmer an Leistungsebene

Wie in Kapitel 2 beschrieben, besteht in (halb-)öffentlichen Forschungsorganisationen die Notwendigkeit zur Abstimmung zentraler, top-down getriebener Planungsprozesse und dezentraler Planungsvorgänge. Die Erarbeitung der Roadmaps lässt sich im vorliegenden Fall als stark „bottom-up“ getriebener Prozess verstehen, welcher daher mit Erwartungshaltungen der Teilnehmer hinsichtlich der tatsächlichen Realisierung einherging. Obwohl die Erarbeitung der drei Pilot-Roadmaps von der Institutsleitung in Auftrag gegeben wurde, bestand nach Fertigstellung der Roadmaps eine ausgeprägte Unsicherheit hinsichtlich der Nutzung der Ergebnisse, bspw. ob entsprechende Mittel auch tatsächlich bereitgestellt werden würden oder wie verbindlich die Roadmaps seien. Zum Teil ließ sich diese Unsicherheit dadurch erklären, dass es das erste Mal war, dass Roadmaps erstellt wurden. Es existierten noch keine Erfahrungswerte hinsichtlich des Umgangs der obersten Hierarchieebenen mit den Roadmaps. Andererseits wäre es offenkundlich für die Roadmap-Teilnehmer frustrierend, wenn die gemeinsam erarbeiteten Ergebnisse nicht auf entsprechende Resonanz treffen würden und die Planung „im Sande verlief“.

Da die Roadmaps sequentiell erarbeitet wurden, schien es sinnvoll, (Zwischen-)Ergebnisse der Roadmaps bei Gelegenheit in entsprechenden Gremiensitzungen zu zeigen, um erstes Feedback von höheren Hierarchieebenen zu sammeln. Zusätzlich wurde im finalen „Lessons-Learned“

Workshop diskutiert, wie eine Verfestigung des Roadmappings nach der Pilotierungsphase aussehen könnte. Diese Integrationsphase würde auch eine Integration der Methode in andere, übergeordnete Planungsprozesse des Instituts vorsehen.

5.3 Limitationen der Untersuchung

Die aus dieser Fallstudie gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Besonderheiten der Durchführung einer Roadmapping-Initiative in einer Forschungsorganisation sind begrenzt. Dies ergibt sich zum einen aus der gewählten Untersuchungsmethode. Eine Fallstudie hat ihre Vorteile hinsichtlich der Untersuchungstiefe, andererseits bringt sie Einschränkungen hinsichtlich der Generalisierbarkeit der Ergebnisse mit sich. Zwar konnten drei verschiedene Pilot-Roadmaps erarbeitet werden, aber eine noch größere Stichprobe, beispielsweise durch Beobachtung der Erarbeitung weiterer Roadmaps am Institut, könnte noch weitergehende Erkenntnisse liefern. Gleiches gilt für die Anwendung der Vorgehensweise bei anderen Forschungsorganisationen.

Es ist auch zu beachten, dass die Roadmaps „nur“ für einzelne Themen des Instituts eingesetzt wurden. Wie aus der Literaturrecherche ersichtlich, könnte das Roadmapping auch für die Planung einer Art „Institutsroadmap“ eingesetzt werden, dann natürlich mit entsprechend höherem Arbeitsaufwand.

Da die Roadmaps erst vor wenig mehr als sechs Monaten erarbeitet wurden, ist es bislang nur in Ansätzen möglich, ihren Nutzen abzuschätzen. Nach Auskunft des Projektleiters ‚Wissenschaftliches Roadmapping‘ hatte sich bis zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Beitrags bereits abgezeichnet, dass die bestehenden Roadmaps aktiv in der Strategieentwicklung der drei beteiligten Forschungsbereiche genutzt werden. Zwei der drei Bereiche hatten mittlerweile sogar begonnen, weitere Zukunftsthemen mit Hilfe der Roadmaps auszuarbeiten. Da im folgenden Jahr ein größerer Planungszyklus am Institut geplant ist, standen seiner Meinung nach die Chancen sehr gut, dass diese Pilot-Themen sich in der Institutsstrategie wiederfinden werden.

6 Zusammenfassung und Fazit

Der vorliegende Beitrag beschreibt die frühe Phase der Einführung der Methode des (Technologie-)Roadmapping in einer Forschungsorganisation. Am Beispiel der Erarbeitung von drei Pilot-Roadmaps wurden die Herausforderungen und Lösungsansätze beschrieben, die bei der erstmaligen Erstellung von Roadmaps zutage traten und auf welche Art und Weise mit diesen Herausforderungen umgegangen wurde.

Es lässt sich feststellen, dass die an den sog. „T-Plan“ angelehnte Roadmapping-Vorgehensweise in Teilen angepasst werden musste. Diese Anpassungen betrafen sowohl die Makroprozesse (den übergeordneten Ablauf der Workshops), als auch die Mikroprozesse (den Einsatz bzw. die Abfolge von Methoden innerhalb bzw. zwischen den Workshops). Insbesondere hinsichtlich des Einbezugs der Menge und Güte an Informationen zur „Markt“-Ebene bestand ein gewisses Informationsdefizit, welches in den Augen der Autoren für Forschungsorganisationen, obwohl es sich in diesem Fall nur um eine singuläre Fallstudie handelte, nicht untypisch sein

dürfte. Daraus ergab sich sowohl die Notwendigkeit, zusätzliche Arbeitseinheiten einzuplanen, als auch die Reihenfolge der Bearbeitung der Roadmap-Ebenen anzupassen. Auf der Mikro-Ebene bestand die Herausforderung, das (naturgemäß) schwer zu beziffernde Marktpotenzial konsistent auf die darunterliegenden Ebenen herunterzubrechen. Hierfür sind für das Roadmapping-Team eindeutige Arbeitsdefinitionen und ein aktive Mitarbeit der Moderatoren erforderlich, so dass eher technikaffinen Mitarbeitern adäquate Hilfestellung geleistet wird. Insgesamt ließ sich ein hohes „Commitment“ feststellen, die dezentral erarbeiteten Roadmaps auch umzusetzen. Auf diese Erwartungshaltung sollten die Leitenden eines Forschungsinstituts vorbereitet sein.

Literatur

[BE06] BEHRENDT, S.; ERDMANN, L.: Integriertes Technologie-Roadmapping zur Unterstützung nachhaltigkeitsorientierter Innovationsprozesse – Endbericht des Projektes Innovationspfade für eine nachhaltige Informationsgesellschaft im Rahmen der sozial-ökologischen Forschung (SÖF) des BMBF 071FS03A. Werkstattbericht / Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung Nr. 84, IZT, Berlin, 2006

[CA04] CAMARINHA-MATOS, L. M.; AFSARMANESH, H.: A Roadmapping Methodology for Strategic Research on VO. In: Camarinha-Matos, L. M.; Afsarmanesh, H. (Hrsg.): Collaborative Networked Organizations. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2004, S. 275–288

[CA11] CAETANO, M.; AMARAL, D. C.: Roadmapping for technology push and partnership: A contribution for open innovation environments. *Technovation*, (31)7, 2011, S. 320–335

[CS18] CRUZ-CASTRO, L.; SANZ-MENÉDEZ, L.: Autonomy and Authority in Public Research Organisations: Structure and Funding Factors. *Minerva*, (56)2, 2018, S. 135–160

[DF23] DING, B.; FERRÀS HERNÁNDEZ, X.: Case study as a methodological foundation for Technology Roadmapping (TRM): Literature review and future research agenda. *Journal of Engineering and Technology Management*, (67), 2023, S. 101731

[FS18] FOCHLER, M.; SIGL, L.: Anticipatory Uncertainty: How Academic and Industry Researchers in the Life Sciences Experience and Manage the Uncertainties of the Research Process Differently. *Science as Culture*, (27)3, 2018, S. 349–374

[Gal98] GALVIN, R.: Science Roadmaps. *Science*, (280)5365, 1998, S. 803

[GB97] GARCIA, M. L.; BRAY, O. H.: Fundamentals of technology roadmapping, 1997

[GJ04] GEFFEN, C.; JUDD, K.: Innovation through initiatives—a framework for building new capabilities in public sector research organizations. *Journal of Engineering and Technology Management*, (21)4, 2004, S. 281–306

[GVD09] GERDSRI, N.; VATANANAN, R. S.; DANSAMASATID, S.: Dealing with the dynamics of technology roadmapping implementation: A case study. *Technological Forecasting and Social Change*, (76)1, 2009, S. 50–60

[HTK17] HUSSAIN, M.; TAPINOS, E.; KNIGHT, L.: Scenario-driven roadmapping for technology foresight. *Technological Forecasting and Social Change*, (124), 2017, S. 160–177

[Ise17] ISENMANN, R.: Technologie-Roadmapping für kleine und mittlere Unternehmen – Vom Konzept des T-Plans zum Leitfaden für KMU. In: Möhrle, M. G.; Isenmann, R. (Hrsg.): Technologie-Roadmapping. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017, S. 261–275

[Ker25] KERR, C.: Planning space exploration: Appraising and appreciating a curated collection of NASA’s roadmap visualizations. *Space Policy*, (71), 2025, S. 101651

[KPT19] KERR, C.; PHAAL, R.; THAMS, K.: Customising and deploying roadmapping in an organisational setting: The LEGO Group experience. *Journal of Engineering and Technology Management*, (52), 2019, S. 48–60

[KS01] KOSTOFF, R. N.; SCHALLER, R. R.: Science and technology roadmaps. *IEEE Transactions on Engineering Management*, (48)2, 2001, S. 132–143

[LPG+15] LOYARTE, E.; POSADA, J.; GAINES, S.; RAJASEKHARAN, S.; OLAIZOLA, I. G.; OTAEGUI, O.; LINAZA, M. T.; OYARZUN, D.; DEL POZO, A.; MARCOS, G.; FLOREZ, J.: Technology roadmapping (TRM) and strategic alignment for an applied research centre: a case study with methodological contributions. *R&D Management*, (45)5, 2015, S. 474–486

[Mac06] MACHATE, A.: Zukunftsgestaltung durch Roadmapping. Diss., 2006

[MDH+02] MACKENZIE, D. R.; DONALD, S.; HARRINGTON, M.; HELMS, T.; HEIL, R.; LUND, D.: Methods in science roadmapping: How to plan research priorities. *Science*, (280)5365, 2002, S. 803–827

[MHD01] MCCARTHY, J. J.; HALEY, D. J.; DIXON, B. W.: Science and technology roadmapping to support project planning: PICMET '01. *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology. Proceedings Vol.1: Book of Summaries (IEEE Cat. No.01CH37199)*. PICMET '01. Portland International Conference on Management of Engineering and Technology. Technology Management in the Knowledge Era. Selected Papers, 29 July-2 Aug. 2001, Portland, OR, USA, PICMET - Portland State Univ, 2001, S. 637–649

[MI17] MÖHRLE, M. G.; ISENmann, R.: Grundlagen des Technologie-Roadmapping. In: Mörhrle, M. G.; Isenmann, R. (Hrsg.): *Technologie-Roadmapping*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017, S. 1–16

[OEC02] Frascati manual 2002 – Proposed standard practice for surveys on research and experimental development. The measurement of scientific and technological activities, OECD, Paris, 2002

[OEC11] OECD: Public Research Institutions – Mapping Sector Trends. OECD Publishing, Paris, 2011

[ORI21] OSBORNE, P.; ROUTLEY, M.; ILEVBARÉ, I.: A Hierarchical Approach to Technology Roadmapping within an RTO Environment. *Research-Technology Management*, (64)3, 2021, S. 58–67

[OT-ol] OKUTSU, S.; TATSUSE, T.: The Elaboration of the Academic Technology Roadmap (ATRM) - Three Cases in Academic Material Science Laboratories -. Unter: <https://dspace.jaist.ac.jp/dspace/bitstream/10119/3801/1/20054.pdf>

[PFP01] PHAAL, R.; FARRUKH, C.; PROBERT, D.: T-plan – The fast start to technology roadmapping; planning your route to success. Centre for Technology Management, Cambridge, 2001

[PFP04] PHAAL, R.; FARRUKH, C.; PROBERT, D.: Customizing Roadmapping. *Research-Technology Management*, (47)2, 2004, S. 26–37

[PFP09] PHAAL, R.; FARRUKH, C. J.; PROBERT, D. R.: Visualising strategy: a classification of graphical roadmap forms. *International Journal of Technology Management*, (47)4, 2009, S. 286

[Sch07] SCHUBERT, C.: Technology Roadmapping in der Halbleiterindustrie: das Hier und Jetzt technologischer Zukünfte am Beispiel der International Technology Roadmap for Semiconductors. TUTS - Working Papers Bd. 2-2007, Berlin, 2007

[SPW+22] SCHIMPF, S.; PHAAL, R.; WECK, O. L. DE; ABELE, T.; UNAV: Praxisstudie Roadmapping Update 2023. Fraunhofer-Gesellschaft, 2022

[TE17] THOBEN, K.-D.; ESCHENBÄCHER, J.: Technologie-Roadmapping in der staatlich geförderten Forschungsplanung: Erkenntnisse aus der Anwendung in europäischen Verbundforschungsprojekten. In: Mörhrle, M. G.; Isenmann, R. (Hrsg.): *Technologie-Roadmapping*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017, S. 277–290

[Wec22] WECK, O. L. DE: Technology roadmapping and development – A quantitative approach to the management of technology. Springer, Cham, Switzerland, 2022

[Wil87] WILLYARD, C. H.: Motorola's technology roadmap process. *Research management*, 1987

[YWK09] YASUNAGA, Y.; WATANABE, M.; KORENAGA, M.: Application of technology roadmaps to governmental innovation policy for promoting technology convergence. *Technological Forecasting and Social Change*, (76)1, 2009, S. 61–79

Autoren

Dr.-Ing. Flavius Sturm studierte Wirtschaftswissenschaften an der Universität Hannover und promovierte an der Universität Stuttgart im Bereich der Arbeitswissenschaften. In seiner Zeit beim Fraunhofer IAO beschäftigte er sich überwiegend mit Methoden des strategischen F&E-Managements, seit 2018 ist er beim Fraunhofer INT als Projektleiter im Geschäftsfeld Corporate Technology Foresight tätig. Seine Schwerpunkte liegen in der Anwendung von Foresight-Methoden wie der Szenario-Technik, dem Horizon Scanning und dem Roadmapping.

Dr. Diana Freudendahl studierte Biochemie an der Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald. Nach der Promotion in organischer Chemie an der Cardiff University (UK), mit anschließender Forschungstätigkeit in der Pharmazie an der Universität Bonn, wechselte sie 2013 zum Fraunhofer INT, wo sie im Bereich der Technologieanalysen und strategischen Planung tätig ist. Inhaltliche Schwerpunkte liegen im Bereich der Werkstoffwissenschaften und der Anwendung von Foresight-Methoden. Seit 2021 leitet sie gemeinsam mit Dr. Anna Schulte-Loosen das Geschäftsfeld Corporate Technology Foresight.

Marco Gallasch arbeitet derzeit an seiner Masterthesis im MBA-Studiengang Unternehmensführung/Finanzmanagement an der Hochschule Koblenz mit dem Schwerpunkt Prozessoptimierung. Seit 2018 ist er am Fraunhofer-Institut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik (FHR) tätig, wo er verschiedene Bereiche wie, unter anderem, Strategie- und Organisationsentwicklung sowie die Verwaltung verantwortete. Seit 2024 unterstützt er das Institut als Business Analyst mit Fokus auf die Optimierung und Digitalisierung von Geschäftsprozessen.

Prof. Dr.-Ing. Sven Schimpf koordiniert als Geschäftsführer die gemeinsamen Aktivitäten des Fraunhofer-Verbunds Innovationsforschung. Er arbeitet seit 2002 als interdisziplinärer Forscher und Vordenker bei der Fraunhofer-Gesellschaft. Seit 2020 hat er die Professur für Innovations- und Interdisziplinaritätsforschung am Institut für Human Engineering & Empathic Design an der Hochschule Pforzheim inne. Zu den Themenfeldern des strategischen FuE-, Technologie- und Innovationsmanagements gehört insbesondere der Zusammenhang zwischen Interdisziplinarität und radikalen sowie potenziell disruptiven Innovationen.

Technology-Canvas und Technology-Deep-Dives – Wissensaggregation durch ausgewogene Technology Push- und Market Pull-Darstellung

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Grienitz¹

¹ Hochschule Wismar, volker.grienitz@hs-wismar.de

Zusammenfassung

Während technologiegetriebene Innovationspfade oftmals eine mangelnde Marktverankerung aufweisen, besteht bei marktorientierten Strategien das Risiko, technologische Kernkompetenzen des Unternehmens zu übersehen oder nicht ausreichend zu entwickeln [HL00]. Der Beitrag zeigt auf, wie durch eine integrative Vorausschaupraxis Market Pull und Technology Push zusammengeführt werden können [HL04], [Laz89], [MHB16], [WGP13].

Der vorliegende Beitrag beschreibt die strategische Vorausschau von technologischen Entwicklungen anhand von paritätischer Bewertung nach Market Pull und Technology Push - vor dem Hintergrund umfangreicher akademischer und Praxiserfahrungen. Dabei werden verschiedene Instrumente und Werkzeuge in den Kontext eines Technology-Canvas gesetzt. Besonderes Augenmerk legt der Beitrag auf die abgestufte Vorgehensweise und Einordnung von Methoden für kleine und mittelständisch geprägte Unternehmen bis zu Varianten für international operierende Konzerne [Lau09]. Die Ergebnisse des Technology-Canvas münden in ein Dokument für die Technologie-Kommunikation - dem Technology-Deep-Dive [Zer09], [Fin09], [ZS23]. Der Beitrag orientiert sich an einem Praxis-Deep-Dive aus dem Bereich der häuslichen Pflege im ländlichen Raum.

Im Mittelpunkt des Market Pull stehen die Integration bewährter Methoden der Zukunftsanalyse. Der Technology Push ist geprägt von Reifegradbeurteilungen und klarer Kundenfokussierung, welche in Technology-Scorecards dokumentiert werden [Gri05].

Ergänzend werden die verschiedenen Möglichkeiten der Informationsbeschaffung von Desk-Research bis hin zu offenen Innovationsformaten, wie Open Innovation, zugeordnet [LBK05]. Aufgrund der zunehmenden Leistungsfähigkeit von KI-Instrumenten, wie die Deep-Research-Analyse durch Chat-Bots, werden deren Einsatzpotenziale im Speziellen kritisch evaluiert [Cha25-ol], [Sch25-ol].

Ziel des Technology-Canvas mit dem Technology-Deep-Dive ist es als kuratierte Methodenintegration, technologiebezogene Entscheidungen auf eine fundierte, zukunftsgerichtete Wissensbasis zu stellen und damit strategisches Technologiemanagement wirksam zu unterstützen.

Schlüsselworte

Technology-Canvas, Technology-Deep-Dive, Technologievorausschau

Technology-Canvas and Technology Deep Dives – Knowledge aggregation through balanced representation of technology push and market pull

Abstract

Whilst technology-driven innovation paths frequently lack market anchoring, market-oriented strategies run the risk of overlooking the company's technological core competences or failing to develop them sufficiently [HL00]. The present article demonstrates how market pull, and technology push can be amalgamated through an integrative foresight practice [HL04], [Laz89], [MHB16], [WGP13].

This article expounds upon the strategic foresight of technological developments, underpinned by a comprehensive evaluation of market pull and technology push. This analysis is informed by a substantial foundation of academic and practical experience, providing a nuanced and well-rounded perspective on the subject matter. The various instruments and tools are placed within the context of a technology canvas. The article pays particular attention to the graduated approach and categorisation of methods for small and medium-sized companies through to variants for internationally operating corporations [Lau09]. The Technology-Canvas results yielded a document for technology communication, entitled the 'Technology Deep Dive' [Zer09], [Flin09], [ZS23]. The present article is grounded in empirical research conducted through a comprehensive field study of home care services in rural areas.

The concept of market pull revolves around the integration of proven future analysis methodologies. The 'technology push' is characterised by an assessment of the degree of maturity and a clear focus on the customer. These aspects are documented in so-called 'technology score-cards' [Gri05].

Furthermore, the diverse methodologies for acquiring information, ranging from desk research to open innovation frameworks such as open innovation, are delineated [LBK05]. In view of the significant increase in the performance of AI tools, such as deep research analysis by chatbots, a critical evaluation of the specific application potential is carried out [Cha25-ol], [Sch25-ol].

The Technology-Canvas with the technology deep dive pursues the objective of facilitating technology-related decisions on a sound, future-oriented knowledge base. This objective is realised through the implementation of a meticulously curated integration of methodologies, thereby ensuring the effective support of strategic technology management.

Keywords

Technology-Canvas, Technology Deep Dive, Technology Management, Technology Foresight

1 Einleitung und Motivation

Technologische Innovationen sind in Zeiten verschiedener Transformationen, wie digitaler, energetischer und mobiler Transformation sowie zunehmender gesellschaftlicher Komplexität ein zentraler Treiber des ökonomischen, ökologischen und sozialen Wandels. Unternehmen sehen sich dabei nicht nur mit einer steigenden Dynamik technologischer Entwicklungen konfrontiert, sondern auch mit einer wachsenden Erwartungshaltung seitens der Märkte, rasch auf sich verändernde Bedürfnisse und Rahmenbedingungen zu reagieren.

Die Spannung zwischen technologieinduzierten Impulsen „Technology Push“ und marktseitigen Anforderungen „Market Pull“ stellt dabei eine der grundlegendsten Herausforderungen aktueller Strategiearbeit dar. Während technologische Neuerungen häufig auf wissenschaftlichem Fortschritt und experimenteller Forschung beruhen, entstehen viele erfolgreiche Geschäftsmodelle gerade aus der präzisen Beobachtung konkreter Bedarfe, Kundenprobleme und gesellschaftlicher Trends.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die wirksame Verknüpfung beider Perspektiven an Relevanz. Die alleinige Fokussierung auf entweder technologische Potenziale oder auf marktwirtschaftliche Anforderungen greift in zunehmend komplexen Innovationsumgebungen zu kurz. Vielmehr bedarf es systemisch wirksamer Analyse- und Bewertungsansätze. Der Bedarf nach einer solchen integrierten Methodik wird insbesondere dort sichtbar, wo knappe Ressourcen, regulatorische Unsicherheit und technologische Volatilität zusammentreffen – etwa im Gesundheitsmanagement, in der Daseinsvorsorge oder in ländlich geprägten Innovationsökosystemen.

Der Technology-Deep-Dive und Technology-Canvas adressieren genau diese Herausforderung: Sie bieten ein ganzheitliches, methodisch fundiertes Rahmenwerk zur strukturierten Analyse technologischer Entwicklungen im Kontext strategischer Markt- und Geschäftsmodellentwicklung. Durch die gezielte Verzahnung von Market Pull- und Technology Push wird eine integrierte Sichtweise, die technologische Machbarkeit, Marktpotenzial, regulatorische Anforderungen und Stakeholder-Interessen gleichermaßen berücksichtigt, um wirksame strategische Optionen ableiten zu können, ermöglicht. Der Technology-Deep-Dive und Technology-Canvas stellen damit nicht nur praktische Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung dar, sondern einen wissenschaftlich anschlussfähigen Beitrag zur Weiterentwicklung des strategischen Technologiemanagements.

2 Balance zwischen Market Pull und Technology Push

Damit Unternehmen in komplexen, dynamischen und global vernetzten Märkten und schnell verändernden technologischen Rahmenbedingungen agieren können, bedarf es bei den Vorausschauaktivitäten einer ausgewogenen Balance zwischen marktgetriebenen Impulsen (*Market Pull*) und technologiegetriebenen Entwicklungen (*Technology Push*). Sie ermöglichen es Unternehmen, frühzeitig relevante Markttrends und technologische Entwicklungen zu identifizieren, deren Vernetzung zu analysieren und daraus zukunftsrobuste Innovationsstrategien abzu-

leiten. Beide Perspektiven erfordern eine integrative Vorausschau, um technologische Machbarkeit mit marktwirtschaftlicher Relevanz in Einklang zu bringen. Unternehmen, die diese Balance systematisch gestalten, steigern ihre Innovationsfähigkeit, reduzieren Marktrisiken und sichern sich langfristige Wettbewerbsvorteile [Laz89], [MHB16].

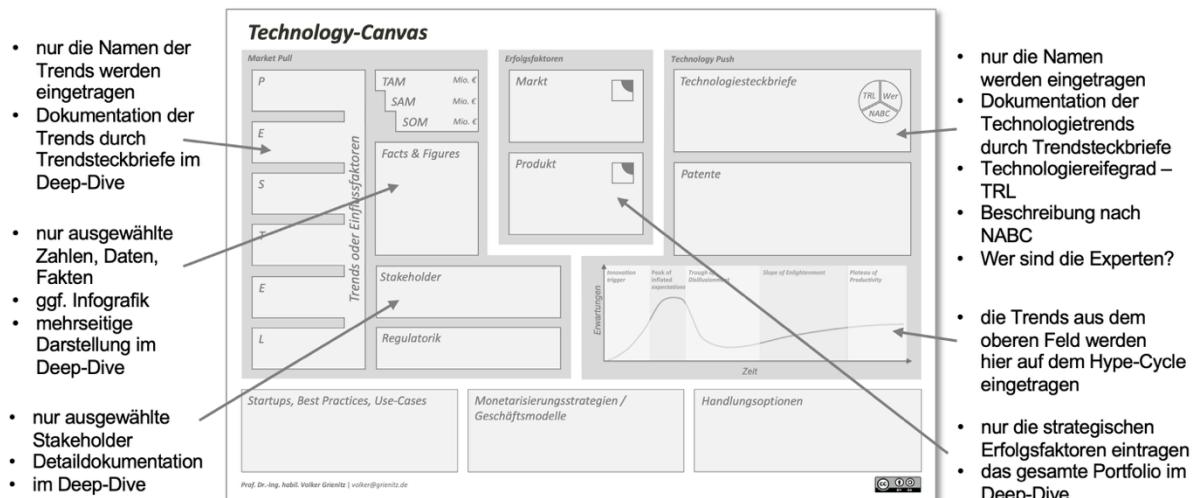
PORTER fasst es pointiert, wie folgt zusammen:

“Technology cannot be studied by itself. It occurs in a context of social, political, financial, personnel and educational factors that must be considered.”
[Por91, S. 250]

Der vorliegende Beitrag orientiert sich an einem Praxisbeispiel des Gesundheits-Managements. Hierbei handelt es sich um einen Technology-Deep-Dive über Automatisierung der Pflege im ländlichen Raum. Der Überblick auf die wesentlichen Inhalte dokumentiert der Technology-Canvas. Jedes Element des Technology-Canvas respektive Technology-Deep-Dive repräsentiert im Folgenden ein Kapitel. Ausgewählte Seiten sind als Bildschirmfoto an entsprechender Stelle eingefügt.

2.1 Generischer Aufbau - Technology Canvas

Grundsätzlich orientiert sich die Struktur des Technology-Canvas an den grundlegenden Beobachtungsbereichen: Market Pull und Technology Push. Im Folgenden werden die Segmente detailliert in Bezug auf wirksame Methoden beschrieben. Dabei werden verschiedene Varianten diskutiert, die durch den möglichen Aufwand bzw. durch die zur Verfügung stehenden Ressourcen getriggert werden (vgl. Bild 1).



Ausbaustufen:

- im Market Pull: Personas, Milieus, Stakeholder-Maps mit Vernetzungen, Szenarien mit Bildern / Landkarte der Zukunft
- Technology Push: Ergebnisse von Delphi-Befragungen, Forschungsprojekte, Technologie-Roadmaps

Bild 1: Generischer Aufbau des Technology-Canvas

Ein kleines mittelständisches Unternehmen führt aufgrund von fehlenden Ressourcen in der Regel eher grundlegende Analysen durch. Da größere Unternehmen oder internationale Konzerne teilweise auf dedizierte Organisationseinheiten zurückgreifen können, bedarf es also eher

eines Zusammentragens der Informationen. Falls über die Basismethoden hinausgehende Erweiterungen sinnvoll sind, werden diese ergänzt und im Detail erläutert.

2.2 Generischer Aufbau – Technology-Deep-Dive

Technologieorientierte Deep-Dives spielen eine entscheidende Rolle bei der Evaluation von Märkten und der Einschätzung von Reifegraden von Technologien, da sie die ausgewogene Berücksichtigung von Market Pull und Technology Push in einem Dokument ermöglichen. Sie werden zu fokussierten Themen, welche von entscheidender Relevanz sind, erstellt. Sie sind die detaillierte Dokumentation zum Technology-Canvas.

Deep Dives sind 50-200-seitige Berichte mit gründlich recherchierten Inhalten, die ansprechend aufbereitet sind, so dass sie anspruchsvolle Inhalte schnell erfassbar darstellen. Folgende Definition pointiert die Inhalte und Rolle:

Ein Technology-Deep-Dive ist ein fundiert recherchierter, aufbereiteter und detaillierter Bericht, der sich auf die ausgewogene Berücksichtigung von Market Pull und Technology Push konzentriert, um Märkte zu evaluieren und den Reifegrad von Technologien einzuschätzen und somit als Basis für fundierte strategische und operative Entscheidungen dient.

Ein Technology-Deep-Dive bedient somit folgende Funktionen:

- *Information:* Der primäre Zweck eines Deep-Dives besteht darin, technologische Informationen klar und präzise zu dokumentieren und damit zu kommunizieren. Relevante marktseitige und technologische Entwicklungen werden beschreiben, ihre Potenziale und Anwendungsbereiche analysiert sowie mögliche Auswirkungen auf Unternehmen und Märkte beschrieben. Verschiedene Stakeholder können schnell verstehen, worum es bei der betrachteten Technologie geht
- *Entscheidungsunterstützung:* Deep-Dives helfen Entscheidungsträgern dabei, fundierte Entscheidungen über Investitionen, Implementierung oder strategische Ausrichtungen zu treffen. Durch die kompakte Darstellung erhalten sie eine schnelle Übersicht über das Potenzial und die Herausforderungen einer Technologie.
- *Kommunikation mit verschiedenen Zielgruppen:* Da Deep-Dives in der Regel nicht technisch oder wissenschaftlich kompliziert verfasst sind, eignen sie sich gut für die Kommunikation mit verschiedenen Zielgruppen, einschließlich Nicht-Experten. Dadurch können komplexe technologische Konzepte für ein breiteres Publikum zugänglich gemacht werden. Sie sind somit nicht nur für verschiedene Zielgruppen im Unternehmen hilfreich - vom Management bis zum Werker.
- *Trendanalyse:* Deep-Dives ermöglichen es, Trends im Markt und in der Technologieentwicklung zu identifizieren. Organisationen können so besser einschätzen, welche Technologien in Zukunft relevant werden könnten und ihre Strategien entsprechend anpassen.

Die Zusammenstellung der Bewertungskriterien erfolgt aus einer anekdotischen Evidenz persönlicher Erfahrungen des Autors. Da ein Deep Dive eine Entscheidungsbasis für Innovationsmanagerinnen und -manager sowie Führungskräfte darstellt, bedarf es einer ausgewogenen

Sammlung an konkreten objektiven Fakten und darüber hinaus durch ein breites Expertengremium gestütztes subjektives Bild zur betrachteten Fragestellung. Ersteres wird vor allem durch die Informationsgrafiken, Zahlen und Fakten des relevanten Marktes abgebildet. Werden verlässliche Quellen verwendet, sind historische Marktbeobachtungen sehr hilfreich. Gerade aber bei der Prognose oder Abschätzung zukünftiger Marktentwicklungen bedarf es einer ausgewogenen Zusammenstellung von verschiedenen Quellen. Darauf aufbauend ist es legitim, dass der Deep Dive pointiert eine Aussage zur zukünftigen Entwicklung postuliert, diese aber nachvollziehbar begründet sein soll.

Die Zusammenstellung der Bewertungskriterien erfolgt aus einer anekdotischen Evidenz persönlicher Erfahrungen des Autors. Da ein Deep Dive eine Entscheidungsbasis für Innovationsmanagerinnen und -manager sowie Führungskräfte darstellt, bedarf es einer ausgewogenen Sammlung an konkreten objektiven Fakten und darüber hinaus durch ein breites Expertengremium gestütztes subjektives Bild zur betrachteten Fragestellung. Ersteres wird vor allem durch die Informationsgrafiken, Zahlen und Fakten des relevanten Marktes abgebildet. Werden verlässliche Quellen verwendet, sind historische Marktbeobachtungen sehr hilfreich. Gerade aber bei der Prognose oder Abschätzung zukünftiger Marktentwicklungen bedarf es einer ausgewogenen Zusammenstellung von verschiedenen Quellen. Darauf aufbauend ist es legitim, dass der Deep Dive pointiert eine Aussage zur zukünftigen Entwicklung postuliert, diese aber nachvollziehbar begründet sein soll.

Stakeholder nehmen nach EVERSHED et. al. eine bedeutende Rolle bei wirksamen Technologie Technologieentscheidungen ein und sind wichtig für die Wettbewerbsfähigkeit, da Produktentwicklung und Produktionstechnologie sich gegenseitig beeinflussen [EHK+02]. WITZEL bestätigt die Relevanz auch durch die sozio-ökonomische Einbindung von Unternehmen im Gesamtsystem der Wirtschaft [Wit19].

Zahlreiche Publikationen im Technologiemanagement beschreiben branchenspezifischen Entwicklungen und Perspektiven. Viele davon haben als Kernmethode die Erfolgsfaktorenanalyse als Bindeglied zwischen dem Markt und der Technik, bspw. [SW99]. So ist TROMMSDORFF der festen Überzeugung, dass die Wettbewerbsposition einer technologieorientierten Geschäftseinheit von der Sicherung ihrer technologisch und marktpsychologisch begründeten Wettbewerbsvorteile mithilfe von Erfolgsfaktoren abhängt [Tro93].

Der Technology Push basiert auf etablierten Methoden der Technologievorausschau. So wird die anwendungsspezifische Anpassungsfähigkeit tradierter Reifegradmodelle durch das von MANKINS entwickelten TRL-Modell verwendet [Man09], [AWS12]. Die Europäische Union nutzt seit 2014 das Rahmenwerk „Technology Readiness Level“ (TRL) zur Bewertung der Reife von Ergebnissen aus EU-finanzierten Forschungs- und Innovationsprojekten [vLP+25]. Ergänzend zum TRL dient der Gartner Hype Cycle als eine weitere etablierte Methode zur Technologievorausschau, die jährliche Aktualisierungen zu Technologieerwartungen und Lebenszyklusphasen in verschiedenen Branchen liefert [Kre15].

Insofern stellt der vorgestellte Technology Canvas und der abgeleitete Technology Deep Dive eine Sammlung von Methoden aus der Erfahrung heraus dar, die aber jederzeit durch weitere Tools, bspw. aufgrund von anwendungsspezifischen Besonderheiten, erweitert werden sollten.

2.3 Market Pull-Perspektive

Die Entstehung und Diffusion technologischer Innovationen können aus unterschiedlichen Kontexten hervorgehen. Das Konzept des Market Pull beruht auf dem gegensätzlichen Prinzip: Innovationen entstehen primär als Reaktion auf konkrete, wahrgenommene Marktbedürfnisse oder explizite Kundennachfragen.

Forschungsergebnisse bestätigen, dass Market Pull-getriebene Innovationen insbesondere dann erfolgreich sind, wenn Kundenbedürfnisse klar artikuliert und technologieoffen umgesetzt werden können. So betonen OLIVEIRA UND VON HIPPEL, dass „need-driven innovation by users“ eine bedeutende Quelle für marktorientierte Neuerungen sei [OH11, S. 806].

Gerade im Zeitalter digitaler Transformation zeigt sich, dass Innovationsdynamik zunehmend in beide Richtungen angeschlossen sein muss. Die Fähigkeit, Kundenprobleme präzise zu identifizieren und auf dieser Basis technologieoffene Lösungsräume zu gestalten, ist zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor geworden. Da eine trennscharfe Abgrenzung zum Technology Push in der Praxis selten gegeben ist, wird beim Technology-Canvas eine kombinierte ausgewogene Betrachtung von zukünftigen Entwicklungen vorgenommen.

2.3.1 Facts & Figures

In diesem Bereich geht es darum, Informationen über Marktumfelder in Form von Zahlen, Daten Fakten in leicht erfassbarer Darstellung aufzubereiten. Grundsätzlich soll die Relevanz des zu gewählten Themas des Technology-Deep-Dives marktseitig untermauert werden.

Das Markt- und Technologieportfolio nach McKinsey ist ein etabliertes Modell des Technologiemanagements, welches in der strategischen Analyse vielfach verwendet wird. Dennoch steht dieses Instrument zunehmend in der Kritik, da es Marktattraktivität und Wettbewerbsposition auf stark vereinfachende Weise aggregiert und keine belastbare datenbasierte Herleitung bietet. Die Bewertung erfolgt häufig subjektiv durch Experteneinschätzungen, was zu erheblichen Verzerrungen führen kann. Vor allem in volatilen Märkten mit schnellen technologischen Entwicklungen reicht diese Methode nicht aus, um valide strategische Optionen abzuleiten. Kategorien wie „attraktiver Markt“ oder „starke Wettbewerbsposition“ sind zu unpräzise und darüber hinaus ist die Bewertungen nur schwer reproduzierbar bis kaum möglich [Ble97].

Für die Beschreibung der aktuellen Marktentwicklungen eignen sich demnach sogenannte Infografiken, die verschiedene statistische Informationen in einer Grafik aggregieren. Hierbei kommt es im Wesentlichen gar nicht so auf den Zukunftsblick an, mehr denn einer Untermauerung der Relevanz des Themas. Besonderes Augenmerk ist jedoch auf die Wahl der Quellen zu legen. Diese sollten zitierfähig und belastbar sein. Dazu zählen insbesondere Regierungsorganisationen (z.B. Bundesministerium für Umwelt, United Nations Datendienst) und zitierfähige Journale (z.B. Technology Foresight and Social Change), Zeitungen (z.B. Handelsblatt)

und Zeitschriften (z.B. Die Zeit) sowie Datenportale, die mit vertrauenswürdigen Daten arbeiten, wie bspw. Statista.de (vgl. Bild 2).

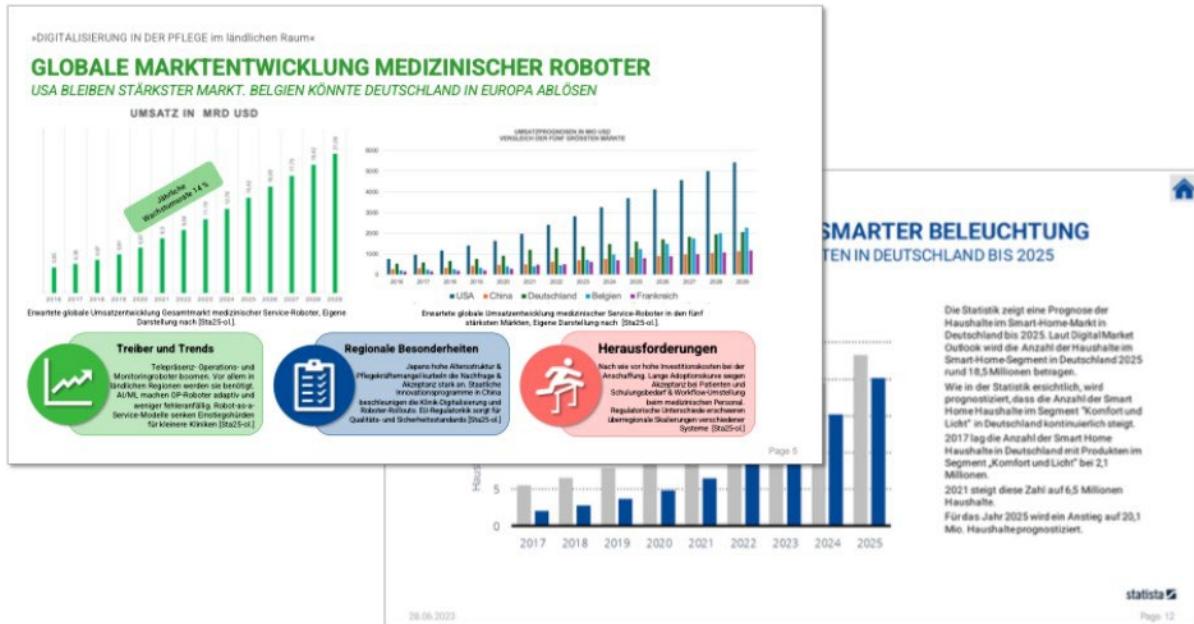


Bild 2: Beispiel für den Bereich „Facts & Figures“ aus dem Bereich medizinische Roboter bzw. Smart Lightning

Für die Abschätzung von Marktentwicklungen, Marktgröße etc. sind die Methoden aus der agilen Geschäftsmodellentwicklung bzw. Lean Startup-Methoden hilfreich, da insbesondere bei jungen Geschäftsmodellen die Marktentwicklungen nicht immer exakt hergeleitet werden können. Hier empfiehlt sich die Marktevaluation mithilfe des Konzeptes TAM (Total Addressable Market), SAM (Serviceable Available Market) und SOM (Serviceable Obtainable Market), welches in der Geschäftsmodellentwicklung ein zentrales Instrument in der unternehmerischen Planung und strategischen Marktbewertung darstellt. Diese drei Stufen bieten eine strukturierte Herangehensweise zur Quantifizierung von Marktpotenzialen, insbesondere für neue Produkte oder Unternehmensgründungen. Die methodische Abgrenzung und hierarchische Differenzierung der Marktgrößen ist nicht nur in der Startup-Finanzierung relevant, sondern wird zunehmend auch in etablierten Unternehmen zur Geschäftsmodellanalyse, Innovationsplanung bzw. im Intrapreneurships eingesetzt [Küp20].

Der *Total Addressable Market* (TAM) stellt die größte Einheit innerhalb dieser Triade dar. Er beschreibt den theoretisch maximal erreichbaren Umsatz für ein Produkt oder eine Dienstleistung ohne Einschränkungen durch geografische, regulatorische oder technologische Barrieren. Der TAM repräsentiert „eine hypothetische Marktobergrenze“, die zwar kaum vollständig erreichbar ist, aber zur strategischen Orientierung und Marktattraktivitätsbewertung dient. Dabei ist es entscheidend, TAM nicht mit Wunschedenken zu verwechseln, sondern auf realistischen Datenquellen wie Branchenreports, statistische Erhebungen oder makroökonomischen Modellen aufzubauen [Küp20].

Im nächsten Schritt wird der *Serviceable Available Market* (SAM) berechnet. Dieser Teilmarkt stellt den Anteil des TAM dar, der mit dem aktuellen Geschäftsmodell, technologischen Fähigkeiten und angebotenen Produkten tatsächlich erreicht werden kann. So wird der SAM durch

Faktoren wie die spezifische Zielgruppe, verfügbare Infrastruktur oder gesetzliche Rahmenbedingungen eingegrenzt. Die Definition des SAM ist entscheidend für die operative Planung, da hier bereits Annahmen über Wettbewerbsfähigkeit und Marktpositionierung einfließen [Küp20].

Die engste Markteinheit innerhalb des Modells stellt der *Serviceable Obtainable Market* (SOM) dar. Hierbei handelt es sich um jenen Teil des SAM, den ein Unternehmen kurzfristig realistisch erreichen kann – unter Berücksichtigung von Marketingbudget, Vertriebskapazitäten, Wettbewerb und Markteintrittsbarrieren. Somit ist SOM ein entscheidender Indikator für kurzfristige Umsatzprognosen [Küp20].

Die Dreiteilung in TAM, SAM und SOM stellt nicht nur eine semantische Differenzierung dar, sondern ein methodisches Fundament für marktorientierte Geschäftsplanung bildet. Gerade durch den Einzug datenbasierter Tools, KI-gestützter Marktanalysen und empirisch fundierter Modelle hat diese Methodik in den letzten Jahren deutlich an Präzision und strategischer Relevanz gewonnen. Ihre Anwendung erfordert jedoch ein sorgfältiges Zusammenspiel aus quantitativer Datenanalyse und qualitativer Marktkenntnis [Dav23].

2.3.2 Regulatorik

In den technologiezentrierten Betrachtungen ist die Integration regulatorischer Informationen von zentraler Bedeutung. Technologische Entwicklungen – bspw. im Bereich Künstliche Intelligenz, autonomer Systeme oder Gesundheitsmanagement – entfalten ihre gesellschaftliche und ökonomische Wirkung nicht im rechtsfreien Raum, sondern stets im Spannungsfeld normativer, rechtlicher und politischer Rahmenbedingungen. Dies betrifft nicht nur Sicherheitsanforderungen und Zertifizierungsstandards, sondern zunehmend auch ethische und datenschutzrechtliche Implikationen. Eine strukturierte Berücksichtigung regulatorischer Aspekte ist daher essenziell, um Technologien nicht nur technisch, sondern auch systemisch valide zu bewerten [MWG21].

Zudem ist festzuhalten, dass sich regulatorische Strukturen selbst in einem Wandel befinden, der durch technologische Dynamiken beschleunigt wird. HOFFMANN-RIEM spricht in diesem Zusammenhang von einer „reflexiven Regulierung“, die Innovation nicht verhindert, sondern aktiv begleitet [HR21]. Regulatorik betrifft auch politische Unterstützung von technologischen Entwicklungen, bspw. durch Subventionen. Diese können Marktentwicklungen beschleunigen oder behindern. Ziel muss es sein, regulatorische Anforderungen zu kennen, ggf. sie nicht nur zu erfüllen, sondern wenn möglich sie auch proaktiv als Gestaltungsparameter zu nutzen [Cza01].

2.3.3 Markttrends oder Zukunftsszenarien

Zukünftige Entwicklungen verlaufen in der Regel nicht linear, sondern sind durch hohe Unsicherheiten und komplexe Einflussfaktoren geprägt. Gerade in technologieorientierten Fragestellungen ist es daher unerlässlich, systematisch über zukünftige Entwicklungen nachzudenken. Die Zukunftsvorausschau (Foresight) bietet dafür methodische Ansätze, um potenzielle

Veränderungen frühzeitig zu erkennen und fundierte strategische Entscheidungen zu ermöglichen.

Trends stellen dabei eine besonders zugängliche Form der Foresight dar. Sie basieren auf der kontinuierlichen Beobachtung von Entwicklungen und lassen sich mit vergleichsweise geringem Aufwand identifizieren und kommunizieren. Gerade für kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die nur begrenzte Ressourcen für strategische Analysen aufbringen können, bieten Trendanalysen eine praktikable Möglichkeit, die Zukunft zu antizipieren [Fin09].

Demgegenüber ermöglichen Zukunftsszenarien eine deutlich tiefere Auseinandersetzung mit zukünftigen Möglichkeitsräumen. Sie beruhen auf der systematischen Kombination von Einflussgrößen, Unsicherheiten und alternativen Entwicklungspfaden. Die Stärke von Szenarien liegt in ihrer Fähigkeit, die Treiber und Möglichkeiten zu veranschaulichen und können helfen resilientere Entscheidungen zu fördern. Besonders in technologieintensiven Kontexten, in denen Disruptionen häufig auftreten und klassische Planungsansätze versagen, sind Szenarien unverzichtbar für eine robuste Zukunftsgestaltung [Pop08].

Nicht jede Person, die einen Technology-Canvas aufstellen möchte, muss Zukunftsszenarien eigenständig entwickeln. Es werden zahlreiche externe Studien publiziert, etwa von wissenschaftlichen Einrichtungen, Beratungsunternehmen oder staatlichen Institutionen, die hochwertige Zukunftsstudien mit Zukunftsszenarien zur Verfügung stellen. Die Nutzung dieser Quellen erlaubt es auch KMU, von fundierten Zukunftsbildern zu profitieren, ohne selbst den vollständigen methodischen Prozess durchlaufen zu müssen.

Zukunftsvorausschau stellt somit ein zentrales Werkzeug für Technology-Canvas dar. Sie unterstützt nicht nur die Einordnung bestehender Entwicklungen, sondern bietet die Grundlage für vorausschauendes, strategisches Handeln. In einem wirtschaftlichen Umfeld, welches von disruptivem technologischem Wandel geprägt ist, ist die Fähigkeit, mögliche Zukünfte systematisch zu reflektieren, ein entscheidender Wettbewerbsvorteil [Fin09].

Trendmanagement

Die systematische Beobachtung und Bewertung des Unternehmensumfelds ist eine essenzielle Voraussetzung strategischer Planung. Mit dem PESTEL-Modell steht ein bewährtes Instrument zur Verfügung, um externe Entwicklungen nach sechs zentralen Kategorien zu klassifizieren: Political, Economic, Social, Technological, Environmental und Legal [DHD+24]. In der Literatur wird auch die Unterteilung nach STEEP vorgenommen [CSH03]. Beide Modelle sind identisch, lediglich die Reihenfolge der Buchstaben variiert und der gesetzliche Rahmen wird bei PESTEL durch den Suchbereich „L“ gesondert pointiert. Die systematische Einordnung makroökonomischer Trends in diese PESTEL-Struktur ermöglicht es Unternehmen, frühzeitig Chancen zu erkennen und Risiken strategisch zu managen. Gleichzeitig vermeidet eine solche Struktur auch blinde Flecken bei der Zukunftsvorausschau [Fin09].

- *Politics* - P - Die *politischen Faktoren* beinhalten politische Rahmenbedingungen, die sich auf Organisationen auswirken können. Dazu gehören Gesetze, Vorschriften, politische Stabilität, Handelsabkommen und internationale Beziehungen. Unternehmen müssen sich mit den politischen Entwicklungen in den Regionen, in denen sie tätig sind, vertraut machen und ihre Geschäftsstrategien entsprechend anpassen.

Darüber hinaus spielen die zunehmenden staatlichen Eingriffe in strategische Sektoren wie Halbleiter, Digitalisierung und Energiepolitik eine Rolle. Bedeutend in der EU ist bspw. der Green Deal Industrial Plan mit dem Ziel, eine resilenter Industriepolitik mit Fokus auf Nachhaltigkeit und technologischer Souveränität zu etablieren [EUR23a].

- *Economy - E* - Die *ökonomischen Faktoren* betreffen wirtschaftliche Bedingungen und Trends. Dazu gehören Aspekte wie Markt- und Branchenentwicklungen, Re-Design globaler Lieferketten als Anpassung an das aktuelle Umfeld [OEC24], Inflation, Zinssätze, Arbeitslosigkeit, Wechselkurse und das allgemeine Wirtschaftswachstum. Organisationen müssen die wirtschaftliche Stabilität im Auge behalten und sich auf mögliche Schwankungen vorbereiten, um ihre langfristige Überlebensfähigkeit zu gewährleisten. Parallel dazu gewinnen digitale Zentralbankwährungen (CBDCs) als neues monetäres Paradigma an Relevanz [BMF25-ol].



Bild 3: Beispieldarstellung der Trendübersicht und Detaildokumentation des Trends „Entwicklung der Pflege-Infrastruktur“

Society - S - Gesellschaftliche Veränderungen manifestieren sich im demografischen Wandel, in kulturellen Trends, sozialen Werten und Lebensstilen, einer gesellschaftlichen Bedeutung von Nachhaltigkeit sowie in veränderten Erwartungen an Arbeitsbedingungen. Die unterschiedlichen Lebensmodelle bspw. der verschiedenen Generationen von X bis Z haben deutliche Auswirkungen auf die Gestaltung von Arbeit, Diversität und Flexibilität [Gal23-ol].

- *Technology - T* - Die *technologischen Faktoren* beziehen sich auf Entwicklungen und Innovationen von Technologie. Dies umfasst Fortschritte in der Informationstechnologie, Automatisierung, Forschung und Entwicklung sowie anderen technologischen Bereichen. In diesem Bereich stehen bspw. die Veränderungen durch Künstliche Intelligenz (KI), ma-

schinelles Lernen, Blockchain und XR-Technologien ebenso im Fokus. Neben den technologischen Diffusionen kommen hier aber auch die gesellschaftliche Akzeptanz oder Hürden der Anwendung zum Tragen.

- *Ecology - E* - Die *ökologische Dimension* wird durch den Klimawandel, Ressourcenknappheit und steigenden Nachhaltigkeitsdruck geprägt. Regulatorische Maßnahmen wie die EU-Taxonomie oder die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) verpflichten Unternehmen zunehmend zu Transparenz über ökologische Auswirkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette [EEA23-ol], [Eur23a-ol]. Der ökologische Fußabdruck wird somit zum Wettbewerbsfaktor und Treiber von Innovation [Wun24].
- *Legal - L* - Abschließend stellen *rechtliche Entwicklungen* ein dynamisches Feld dar, das sich insbesondere auf digitale Geschäftsmodelle auswirkt. Datenschutzvorgaben wie die DSGVO sowie neue gesetzliche Regelwerke – etwa der EU AI Act oder das Lieferketten-sorgfaltspflichtengesetz – erhöhen den Handlungsdruck auf Compliance, IT-Governance und Risikomanagement [FLO22], [Eur24-ol].

Das PESTEL-Modell ist somit nicht nur ein analytisches Klassifikationsschema, sondern ein integraler Bestandteil strategischer Frühaufklärung. Es hilft Unternehmen, Umweltentwicklungen in Form von Trends ganzheitlich zu verstehen und zu priorisieren. Gleichzeitig sind Trendsteckbriefe nach dieser Struktur eine hervorragende Basis für die Entwicklung robuster Zukunftsszenarien [Fin09], [Gri24].

2.3.4 Stakeholder

Stakeholder sind Personen oder Gruppen, die durch ihr Handeln Einfluss auf Organisationen nehmen oder von deren Entscheidungen betroffen sind. Sie lassen sich in interne und externe Akteure unterteilen, etwa Mitarbeitende, Führungskräfte, Kundschaft, Zulieferer, Investoren oder staatliche Institutionen. Im Rahmen der strategischen Planung und des technologischen Managements kommt Stakeholdern eine besondere Bedeutung zu. Sie tragen entscheidend zur Ressourcensicherung bei, bieten Zugang zu Kapital, Wissen und Netzwerken und helfen durch ihr Feedback dabei, Risiken frühzeitig zu erkennen und Innovationsprozesse marktgerecht auszurichten [Fre10].

Die Einordnung von Stakeholdern anhand der Dimensionen Macht und Kooperationspotenzial, nach FREEMAN, bildet die Grundlage für ein differenziertes Management stakeholder-bezogener Interessen. Macht beschreibt die Fähigkeit eines Stakeholders, organisationale Entscheidungen zu beeinflussen, während Kooperationspotenzial angibt, inwieweit er zur Zielerreichung, im speziellen von technologischen Innovationen, beitragen kann. Stakeholder mit hohem Macht- und Kooperationspotenzial, etwa Investoren oder strategische Partner können bspw. als Befähiger und Ermöglicher oder Verhinderer über ihre finanziellen Ressourcen agieren und erfordern besonders enge und vertrauensvolle Beziehungen [Rol+21]. Stakeholder mit hoher Macht, aber geringem Kooperationspotenzial, etwa Aufsichtsbehörden oder kritische NGO, können dagegen durch Regulation oder öffentliche Kritik auf technologie-getriebenen Risiken hinweisen oder gar erhebliche Risiken verursachen. Hier ist ein strategisches Lobby- bzw. Krisen- und Kommunikationsmanagement erforderlich [Fre10].

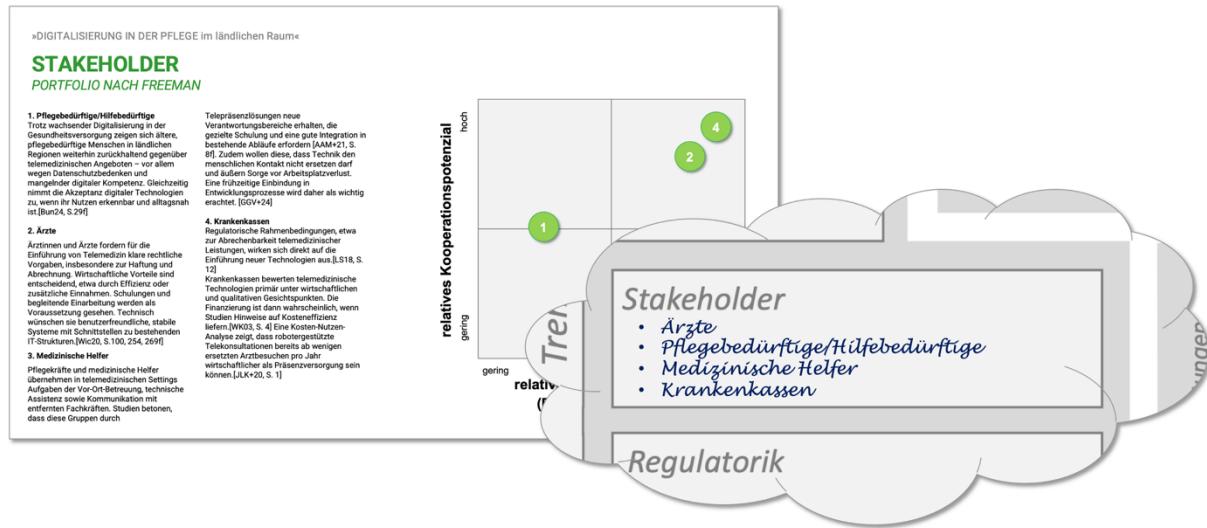


Bild 4: Stakeholder-Übersicht mit Ausschnitt aus dem Technology-Canvas

Alle anderen Stakeholder sind nicht vernachlässigbar, spielen aber eine nachhaltige Rolle für die Entscheidung oder das Management von technologischen Innovationen. Organisationen sind gut beraten, durch gezielte Kommunikationsmaßnahmen insbesondere in sozialen Medien und anderen Kanälen Kontakt zu halten [MAW97].

2.3.5 Erfolgsfaktoren Markt und Produkt

Erfolgsfaktorenportfolios sind das zentrale Instrument des Technology-Canvas. Sie bilden das Bindeglied zwischen Market Pull und Technology Push. Der Market Pull kondensiert sich in den Erfolgsfaktoren des Marktes – den externen Erwartungen des Marktes und die des Technology Push in den Produkterfolgsfaktoren. Verglichen mit anderen Methoden der Produktentwicklung, wie der QFD, erfolgen die marktseitigen und technologischen Priorisierungen durch den Markt und die technisch relevanten Parameter für die Produktentwicklung priorisiert [OST+20]. Besonders unter dynamischen Marktbedingungen, disruptiven Technologien oder bei Neuausrichtungen bieten Erfolgsfaktoren den Organisationen eine fundierte Grundlage zur Strategieentwicklung [GAU+23]. Sie legen systematisch, auf Basis von Stärken und Schwächen, strategische Potenziale frei.

Die Ergebnisportfolios für Markt und Produkt sind identisch aufgebaut und basieren auf zwei Achsen: Die Y-Achse beschreibt die Markt- bzw. Wettbewerbsrelevanz eines Faktors, unabhängig vom betrachteten Unternehmen. Die X-Achse bewertet die relative Stärke des Unternehmens im Vergleich zum Wettbewerb. Daraus ergeben sich vier zentrale Felder: strategische, kritische, ausgeglichene und überbewertete Erfolgsfaktoren [MÜL+23]. Strategische Erfolgsfaktoren zeichnen sich durch hohe Relevanz und überdurchschnittliche Kompetenz des Unternehmens aus – sie sind essenziell für nachhaltigen Erfolg. Kritische Erfolgsfaktoren hingegen bergen bei schlechter Ausprägung unmittelbare Risiken. Überbewertete Faktoren suggerieren Ressourcenbindung ohne marktseitige Wirkung – ein Indikator für strategische Fehlfokussierung [GAU+23]. Insgesamt stellt das Erfolgsfaktorenportfolio ein hochwirksames Instrument dar, das mit Hilfe visueller Analyse und datenbasierter Bewertung Entscheidungsprozesse fundiert unterstützt und dynamikrobuste Strategien fördert [JOH+20].

In den Technology-Canvas werden die strategische Erfolgsfaktoren übertragen.

2.4 Technology Push-Perspektive

Innovationen entstehen nicht allein durch die Reaktion auf Marktbedürfnisse, sondern häufig durch bahnbrechende technologische Entwicklungen in Hochschulen, Entwicklungsabteilungen oder anderen Forschungsinstitutionen, die neue Anwendungsfelder erschließen. Der Begriff Technology Push beschreibt Innovationsprozesse, die primär durch neue wissenschaftlich-technologische Erkenntnisse und deren technische Umsetzung ausgelöst werden – unabhängig von einem unmittelbar bestehenden Nachfragebedürfnis. Damit steht Technology Push im konzeptionellen Gegensatz zum Market Pull [WGP13].

Die strategische Relevanz technologiegetriebener Innovationen liegt in ihrem disruptiven Potenzial. Neue Materialien, Verfahren oder IT-basierte Technologien können bestehende Märkte radikal verändern oder gänzlich neue Märkte schaffen. Beispielsweise haben Entwicklungen in der Halbleitertechnologie nicht nur die Computerindustrie revolutioniert, sondern zur Entstehung digitaler Geschäftsmodelle überhaupt erst ermöglicht, die ursprünglich nicht durch Marktnachfrage initiiert wurden [MR07]. Allerdings bringt die alleinige Fokussierung auf Technology Push auch Herausforderungen mit sich: Die Unsicherheit über künftige Märkte, regulatorische Rahmenbedingungen oder Akzeptanzfragen im Nutzerverhalten, erschwert die zielgerichtete Entwicklung [GSS20].

2.4.1 Gartner-Hype-Cycle - Ein strategisches Modell zur Bewertung technologischer Trends

Der Gartner-Hype-Cycle ist seit den späten 90-er Jahren ein etabliertes Modell zur Bewertung technologischer Entwicklungen und dient Unternehmen als Entscheidungshilfe hinsichtlich Technologiemanagement. Entwickelt von der gleichnamigen US-amerikanischen Beratungsfirma Gartner, illustriert das Modell den Lebenszyklus neuer Technologien anhand von Erwartungen, Enttäuschungen und realistischen Nutzeneinschätzungen [FR08].

Der Hype-Cycle besteht aus fünf aufeinanderfolgenden Phasen: dem technologischen Auslöser, dem Gipfel der überzogenen Erwartungen, dem Tal der Enttäuschungen, dem Pfad der Erleuchtung und schließlich dem Plateau der Produktivität. Jede dieser Phasen beschreibt eine typische Entwicklungsstufe, die eine neue Technologie im Verlauf ihrer Adaption durchläuft [FR08].

Im Rahmen des Technology-Canvas bietet der Gartner-Hype-Cycle eine strukturierte Orientierung zur Einordnung verschiedener technologischer Trends. Sein besonderer Nutzen liegt darin, komplexe technologische Entwicklungen in einem verständlichen, zeitlich geordneten Modell grafisch darzustellen. Durch die Visualisierung der jeweiligen Position einer Technologie entsteht eine differenzierte Perspektive auf kurzfristige Hypes und langfristig tragfähige Entwicklungen.

Kritiker bemängeln, dass der Hype-Cycle nicht den tatsächlichen Nutzen, sondern lediglich Wahrnehmung, Marktakzeptanz bzw. Marktdiffusion abbildet, weil Angaben zur Technologischen Reife unberührt bleiben [BS22]. Aus diesem Grund werden weitere Bewertungen bei der Dokumentation von Technologietrends hinzugezogen.

Der Gartner-Hype-Cycle wird als Übersichtsgrafik in dem Technology-Canvas sowie als Einstiegsgrafik für das Kapitel der Technologiesteckbriefe im Technology-Deep-Dive abgebildet.

2.4.2 Technologietrends mit NABC beschreiben und TRL

Der NABC-Ansatz wurde von CARLSON UND WILMOT am renommierten SRI International entwickelt, um Innovationsprozesse systematisch und kundenorientiert zu gestalten. Ziel war es die Überbetonung der technischen Errungenschaften, welche Entwickelnde gern in den Vordergrund stellen, auf die Kundenbedarfe auszurichten. Dazu werden die vier Kernelemente: Needs, Approach, Benefits und Competition verwendet [CAR06]. Üblicherweise würden technologisch geprägte Personen das „A“ überbetonen. Vielmehr kommt es aber darauf an, besonderen Wert auf das „N“ sowie das „B“ zu legen. Der Ansatz motiviert zu einem klaren Problemverständnis - Need, zur Beschreibung der technischen Umsetzung - Approach, zur Pointierung des Mehrwerts - Benefit und zur Abgrenzung gegenüber bestehenden Marktangeboten - Competition.

Dieses Modell stellt die Basis der Technologie-Steckbriefe dar, wobei die besondere Aufmerksamkeit auf dem Need und dem Benefit liegen.

Dennoch ist der Ansatz nicht frei von Kritik: So wird etwa betont, dass Kundenbedürfnisse bei radikalen Innovationen oft noch nicht formuliert sind und die Methode primär für evolutionäre Entwicklungen geeignet sei [Tro21].

2.4.3 Technologiereife mit TRL evaluieren

Das TRL-Modell wurde von dem NASA-Ingenieur MANKINS entwickelt. Es umfasst neun Stufen, die jeweils einen bestimmten Grad der technologischen Entwicklung und Erprobung darstellen – von der grundlegenden Beobachtung des Funktionsprinzips (TRL 1) bis zur erfolgreich nachgewiesenen Anwendung (TRL 9) [Man09]. Die Bewertungen der Stufen ist zwar sehr gut durch die verschiedenen Entwicklungsstufen eines Systems abgegrenzt. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass subjektive Eindrücke die Wahl des TRL beeinflussen könnten. Hinzu kommt noch, dass Marktanforderungen oder -chancen, Kundengruppen oder Marktreife dabei nicht berücksichtigt. Für diese Aspekte könnte das Markt-Reifegradmodell nach KOBOS et al. [KMW+18] hilfreich sein [VMS21]. Dennoch ist der Technology-Readiness-Level inzwischen das etablierte Modell zur vergleichenden Einschätzung von technologischen Reifegraden. Die EU hat mit dem Programm „Horizon 2020“ die Wirksamkeit der Methode durch ihre Anwendung manifestiert [EU25-ol].

Die erste Anwendung des TRL-Systems erfolgte in der Luft- und Raumfahrtindustrie. Es zeigte sich jedoch schnell, dass es vielfältig einsetzbar ist, sodass es heute als Grundlage zur Bewertung von Forschungsprojekten und zur Einschätzung zukünftiger Technologien in verschiedenen Branchen und Themenbereichen dient.

- *TRL 1 – Grundlagenforschung*

In dieser Phase erfolgt wissenschaftliche Forschung zur Erkundung des Potenzials einer Technologie und zur Gewinnung erster Erkenntnisse. Es handelt sich um theoretische Studien, Labortests und grundlegende Experimente, die dem vertieften Verständnis neuer Technologien dienen. Praktische Anwendungen oder Prototypen gibt es noch nicht; stattdessen wird die theoretische Grundlage gelegt.

- *TRL 2 – Konzeptentwicklung*

Das theoretische Konzept wird konkretisiert. Erste Experimente werden mit ausgewählten, möglicherweise kritischen oder bahnbrechenden Funktionen durchgeführt, um deren grundsätzliche Machbarkeit zu testen. Ziel ist es, das Verständnis für Nutzen und Umsetzbarkeit zu vertiefen und Entwicklungsrichtungen abzuleiten.

- *TRL 3 – Machbarkeitsnachweis (Proof of Concept)*

In dieser Phase erfolgt eine analytische und experimentelle Überprüfung des Konzepts zur Bestätigung grundlegender Funktionen und Prinzipien in einer Versuchs-umgebung. Damit wird die erste praktische Bestätigung der Machbarkeit des Konzepts erbracht.

- *TRL 4 – Laborprototyp*

Ein funktionaler Prototyp wird entwickelt, der die Grundfunktionen des Systems demonstriert und validiert. Der Übergang von der Konzeptvalidierung zum funktionsfähigen Modell findet statt. Technische Herausforderungen werden angegangen, um die angestrebten Funktionen sicherzustellen.

- *TRL 5 – Funktionsmodell*

Das Modell wird in einer relevanten realitätsnahen Umgebung getestet. Dabei werden Komponenten und Subsysteme geprüft, um die Funktionalität unter realistischen Bedingungen zu bestätigen. Erste Hinweise auf eine erfolgreiche Implementierbarkeit werden sichtbar.

- *TRL 6 – Prototyp in simuliertem Einsatz*

Der Prototyp wird unter nahezu realen Bedingungen getestet. Systemtests werden durchgeführt, um die Leistung zu validieren und reale Herausforderungen zu simulieren. Die Dokumentation ist begrenzt, der Fokus liegt auf praktischer Erprobung.

- *TRL 7 – Demonstrator in realer Umgebung*

Ein nahezu maßstabsgetreuer Prototyp mit vollständiger Systemintegration wird in der vorgesehenen Einsatzumgebung erprobt. Diese Phase ist entscheidend für die Beurteilung der praktischen Anwendbarkeit der Technologie.

- *TRL 8 – Vorserie (Pilotserie)*

Das qualifizierte System wird durch Tests als serienreif nachgewiesen. Die Produkte dieser Phase entsprechen weitgehend der späteren Serienfertigung, sind jedoch noch nicht marktverfügbar. In der Automobilindustrie werden beispielsweise Kälte- oder Hitzetests sowie Crashtests durchgeführt.

- *TRL 9 – Serienprodukt*

Höchster Reifegrad: Das Produkt ist marktreif. Alle notwendigen Tests und Validierungen wurden erfolgreich abgeschlossen, sämtliche Anforderungen und Normen sind erfüllt.

Mit dem TRL-Modell kann der aktuelle Entwicklungszustand eines technologischen Systems objektiv bewerten werden. Es hilft bei der Risikoidentifikation und schafft die Grundlage für eine gezielte Weiterentwicklung und Umsetzung. Wird das TRL-Modell mit den Prozess-Phasen der eigenen Forschungs- und Entwicklungsabteilung verknüpft, kann ein ursprünglich starrer Stage-Gate-Prozess in ein agiles Steuerungsinstrument umgewandelt werden.

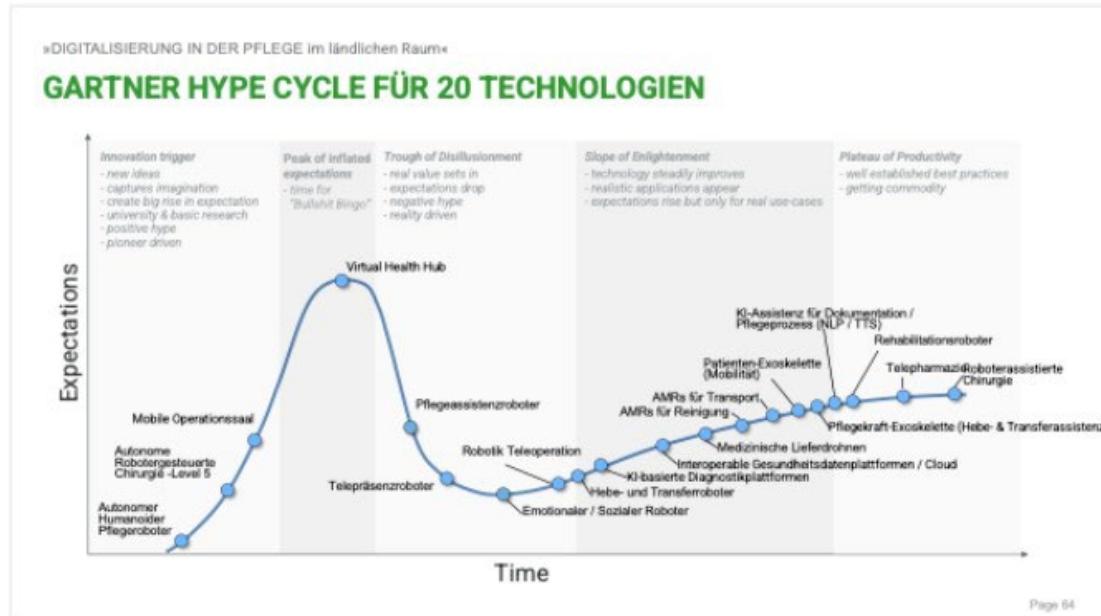


Bild 5: Beispiel-Technologieübersicht auf Gartner-Hype-Cycle



Bild 6: Detaildokumentation im Technologiesteckbrief aus dem Bereich Pflegemanagement & Beispiel Smart Lightning

Alle im Gartner-Hype-Cycle betrachtete Technologien sind für die Fragestellung relevant und sollten in der Form eines Technologiesteckbriefes dokumentiert werden. Wesentliches Strukturmerkmal des Steckbriefes, ist die *Beschreibung nach NABC, der Reifegrad nach TRL sowie die Angabe von Ansprechpersonen, Organisationen und Quellen*.

2.4.4 Patente

Patente sind ein zentrales Instrument zur Sicherung technologischer Innovationen und stellen gleichzeitig eine wertvolle Quelle für technologiebezogene Analysen dar. Sie dienen nicht nur dem rechtlichen Schutz technischer Erfindungen, sondern sind auch bedeutende Indikatoren für den Stand der Technik. Im Kontext von Technologie-Scouting, Foresight oder der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle bieten Patentanalysen fundierte Einblicke in technologische Trends und Wettbewerbsdynamiken.

Die Nutzung von Patenten als Analyseinstrument birgt jedoch sowohl Chancen als auch Herausforderungen. Einer der zentralen Vorteile ist die umfangreiche technische Detailtiefe, die durch Patentschriften öffentlich verfügbar wird. Damit bieten sie eine einzigartige Datenbasis zur Identifikation von Entwicklungspfaden, White Spots oder Innovationsclustern. Patente können in Datenbanken wie Espacenet (<https://worldwide.espacenet.com>), dem Deutschen Patent- und Markenamt (<https://depatisnet.dpma.de>) oder dem United States Patent and Trademark Office (<https://www.uspto.gov>) kostenfrei recherchiert werden.

Ein bedeutsamer Nachteil liegt im zeitlichen Verzug zwischen der Anmeldung und der Veröffentlichung von Patenten. Dieser Zeitraum beträgt in der Regel 18 Monate [DPM25-ol], wodurch aktuelle Entwicklungen unter Umständen nicht sofort sichtbar sind. Dieser Verzug kann besonders bei disruptiven Technologien zu strategischen Fehleinschätzungen führen, wenn sich Analysen ausschließlich auf öffentlich einsehbare Schutzrechte stützen.

Auch der Einsatz von Patentanwälten bringt Vor- und Nachteile mit sich. Während sie durch ihre juristische und technische Expertise eine essenzielle Rolle bei der rechtskonformen Formulierung und strategischen Ausrichtung von Patenten spielen, sind ihre Dienste mit hohen Kosten verbunden.

2.5 Übergreifende Perspektiven zu Market Pull und Technology Push

Der Technology-Canvas dient als strukturiertes Dokumentationsmedium, um die Potenziale neuer Technologien im Kontext von Marktentwicklungen unternehmerische Handlungsoptionen aufzuzeigen. Dabei rücken, neben der Reife oder Erfolgsfaktoren auch übergreifende Aspekte in den Fokus, die über eine rein technologische oder marktseitige Betrachtung hinausgehen. Besonders bedeutsam ist hierbei die Integration von Market Pull und Technology Push.

Ein übergreifender Bereich analysiert Startups, im Spannungsfeld zwischen Marktbedarfen und technologischer Innovation. Die Untersuchung umfasst Fragen nach der Anzahl und Qualität relevanter Gründungen. Ein anderer Bereich beleuchtet zugrundeliegende Geschäftsmodellmechaniken sowie möglichen Differenzierungsstrategien. Sie geben die Basis für Evaluation von strategischen Partnerschaften, M&A im Allgemeinen und über Technologietransfer bis hin zur

Entwicklung neuer Geschäftsfelder im Speziellen. Der dritte Bereich dokumentiert die strategischen Handlungsoptionen für die auftraggebende Organisation.

2.5.1 Startups, Anwendungsbeispiele und Best Practices

Erfolgreiche Startups fokussieren in der Regel aufgrund knapper Ressourcen auf einen sehr spezifischen Markt mit einem sehr schmalen Angebot. Das bringt i.d.R. eine hohe Exzellenz in diesem Wertever sprechen mit sich. Für technologische Entwicklungen ist es sinnvoll, rechtzeitig potenzielle Marktteilnehmer zu kennen und die Entscheidung in der Forschung und Entwicklung für ein Make or Buy zu treffen. Anhand der Beurteilung von Technologiereife und Position auf dem Gartner-Hype-Cycle können eigene Entwicklungen antizipiert werden, wieviel Ressourcen für einen erfolgreichen Marktangang noch zu erbringen sind. Strategisch kann es sinnvoll sein, mit Startups zu kooperieren oder sie helfen dabei sein eigenes Wertever sprechen im Markt abzugrenzen und damit zu schärfen.

2.5.2 Geschäftsmodelle und Monetarisierungs-Strategien

Die Entwicklung tragfähiger Geschäftsmodelle stellt eine zentrale Herausforderung für technologieorientierte Innovationsprozesse auf Basis der Technology-Canvas dar. Im Kontext technologiegetriebener Innovationen, ist die Gestaltung eines geeigneten Geschäftsmodells – verstanden als das Zusammenspiel von Wertversprechen (value proposition), Wertschöpfungsarchitektur (value creation) und Erlösmechanik (value capture) – von entscheidender Bedeutung für den wirtschaftlichen Erfolg einer Innovation [GFC20], [OP11], [OPB+15]. Monetarisierungs-Strategien berücksichtigen die Skalierbarkeit und betrachten klassische Verkaufserlöse über nutzungsbasierte Modelle bis hin zu hybriden Plattformansätzen oder datengetriebenen Wertschöpfungsmechanismen [Tee18].

Weiterhin können nachhaltige Geschäftsmodellansätze eine Orientierung geben, die nicht nur ökonomische, sondern auch ökologische und soziale Werte adressieren. Ein prominenter Bezugsrahmen hierfür sind die sogenannten „Re-x“-Modelle, die unter anderem Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Recycle, Refuse, Rethink, Reduce und Recover umfassen [WGS22]. Diese Geschäftsmodelle ermöglichen neuartige Monetarisierungs-Strategien wie etwa Pay-per-Use, Lifetime Extension Services oder Material-as-a-Service und bieten Unternehmen im Rahmen des Technology-Canvas neue Pfade zur Wertschöpfung und Differenzierung – insbesondere im Übergang von linearen zu zirkulären Wertschöpfungssystemen. So eröffnen Re-x-Modelle im Technology Push-Kontext etwa die Möglichkeit, neue technologische Verfahren zur Remanufacturing-Fähigkeit bereits in der Design-Phase zu berücksichtigen. Im Market Pull-Kontext wiederum reagieren Unternehmen verstärkt auf regulatorische Anforderungen (z. B. EU Ecodesign Directive) [Eur25-01] oder verändertes Nutzerverhalten mit Reuse- oder Repair-Services. So werden bspw. zentrale Herausforderungen der Ressourceneffizienz, Produktverantwortung und Resilienz gegenüber volatilen Rohstoffmärkten adressiert.

2.5.3 Strategische Optionen

Strategische Optionen beschreiben mögliche strategische Handlungsweisen eines Unternehmens, um technologische Potenziale mit unternehmerischen Zielsetzungen zu verbinden und in der Zukunft erfolgreich zu sein. Dabei umfasst ein Strategieprozess nicht nur die Wahl eines bestimmten Geschäftsmodells, sondern auch Entscheidungen über Positionierung, Timing, Kooperationsformen, Technologiepfade, Internationalisierungsstrategien oder den Grad an Offenheit der Innovation (Open vs. Closed Innovation). Diese Optionen sind in besonderem Maße kontextabhängig und variieren entlang des Kontinuums zwischen Technology Push und Market Pull [GK06].

Im Technology-Push-Kontext etwa stehen Unternehmen häufig vor der Entscheidung, ob sie auf frühe Marktführerschaft setzen (First Mover), Patente lizenzieren oder Partnerschaften eingehen sollen, um technologische Risiken zu teilen. Im Market-Pull-Modus hingegen dominieren strategische Optionen wie die schnelle Anpassung existierender Technologien an Kundenbedürfnisse oder die Implementierung agiler Produktentwicklungsprozesse.

Ein besonderer Fokus liegt auf der Integration der Ambidextrie zwischen Exploitation (Nutzung bestehender Kompetenzen) und Exploration (Erkundung neuer Potenziale). Die Fähigkeit eines Unternehmens, zwischen kurzfristig rentablen Optionen und langfristig disruptiven Innovationspfaden zu balancieren, wird zunehmend als zentraler Erfolgsfaktor betrachtet – insbesondere in Branchen mit hoher technologischer Volatilität [ANF16], [LKR+23].

3 Informationsbeschaffung

Im Rahmen technologieorientierter Wissensaggregation, wie sie durch den Technology-Canvas bzw. die Technology-Deep-Dives verfolgt werden, kommt der systematischen Informationsbeschaffung eine zentrale Rolle zu. Der klassische Ausgangspunkt ist eine Desk Research, die in der wissenschaftlichen Praxis als Sekundärforschung verstanden wird. Hierbei werden öffentlich zugängliche Informationsquellen wie wissenschaftliche Fachliteratur, Patente, Marktstudien, White Papers, Konferenzbeiträge oder Branchenberichte systematisch ausgewertet. Tools wie Google Scholar, Scopus oder Web of Science sowie spezialisierte Repositorien, wie ResearchGate oder arXiv, ermöglichen die strukturierte Sichtung und Kategorisierung relevanter Inhalte. Ergänzt wird dies zunehmend durch KI-gestützte Werkzeuge wie elicit.org, die eine automatisierte Recherche, das Ableiten von Hypothesen und die semantische Extraktion relevanter Argumente aus der Literatur unterstützen. Ebenso bietet ResearchRabbit (www.researchrabbit.ai) Funktionen zur Visualisierung von Literaturclustern und erkennt emergente thematische Konvergenzen – ein nicht zu unterschätzender Vorteil im Hinblick auf technologische Trends und deren systematische Erfassung.

Offene Innovationsformate wie Open Innovation, Crowdsourcing oder Ideation-Plattformen wie Innocentive (www.innocentive.com) oder OpenIDEO (www.openideo.com) stellen hingegen eine Erweiterung des Suchraums dar, indem sie den Einbezug externer Akteursgruppen wie Startups, Endnutzer oder universitäre Forschungseinrichtungen ermöglichen. Diese Formate fördern insbesondere Market-Pull-orientierte Fragestellungen und ergänzen klassische Technology-Push-Ansätze, indem sie Nutzerbedarfe in frühen Phasen identifizieren. Auch Plattformen

wie Kaggle (www.kaggle.com) liefern relevante Impulse zur Identifikation innovativer Methoden oder technologischer Ansätze im Kontext von Machine Learning oder Data Science [Cha25-ol], [Sch25-ol], [LBK05].

In jüngerer Zeit verschiebt sich die Aufmerksamkeit zunehmend auf KI-basierte Recherche- und Analyseformate. Sogenannte Deep-Research-Analysen durch spezialisierte Chatbots oder Large Language Models (LLMs) wie GPT-4 ermöglichen die semantisch fundierte Generierung, Verdichtung und kritische Reflexion von Fachinhalten. Dabei entstehen neue Möglichkeiten zur themenübergreifenden Sondierung, etwa durch die Verknüpfung technischer und ökonomischer Perspektiven. Der kritische Mehrwert liegt in der Geschwindigkeit, Skalierbarkeit und Kontextualisierbarkeit der Analyse – auch über disziplinäre Grenzen hinweg. Dennoch bedarf der Einsatz solcher Instrumente einer fundierten methodologischen Einordnung: Die Relevanzbewertung durch LLMs basiert primär auf Wahrscheinlichkeiten, nicht auf evidenzbasierter Argumentation. Zudem fehlen häufig Transparenz über die zugrundeliegenden Quellen, was insbesondere bei der wissenschaftlichen Nachvollziehbarkeit und Zitierfähigkeit problematisch ist.

Insgesamt ergibt sich ein komplexes Bild der verschiedenen Informationsquellen, die – sinnvoll orchestriert – eine ausgewogene Perspektive im Sinne des Technology Push und Market Pull ermöglichen. Die Kombination klassischer wissenschaftlicher Recherchetools mit kollaborativen Innovationsplattformen und KI-gestützten Analyseverfahren markiert einen Paradigmenwechsel in der Wissensgenerierung.

4 Fazit und zukünftige Entwicklungen

Der vorliegende Beitrag verdeutlicht, wie durch die strukturierte Anwendung eines Technology-Canvas mit einem systemischen Blick ein Beitrag zum ganzheitlichen Technologiemanagement gelingen kann, welches sowohl marktseitige als auch technologische Perspektiven integriert. Insbesondere die Kombination von Market Pull und Technology Push wird nicht nur theoretisch beleuchtet, sondern praxisnah durch Methoden und Instrumente wie TAM/SAM/SOM, PESTEL, dem Gartner Hype Cycle oder dem Erfolgsfaktorenportfolio operationalisiert. Dadurch entsteht ein strukturierter und zugleich flexibler Orientierungsrahmen für technologieorientierte Innovationen. Die Anwendung auf ein konkretes Praxisbeispiel im Gesundheitsmanagement im ländlichen Raum verleiht der theoretischen Darstellung eine zusätzliche Tiefe und Validität.

4.1 Limitationen

Gleichwohl weist der Ansatz auch einige Schwächen auf. So fehlt eine empirische Validierung, die den Erfolg des Canvas-Ansatzes im Vergleich zu anderen Innovationsmodellen messbar machen könnte.

Die eingesetzten Methoden beruhen in Teilen auf subjektiven Einschätzungen, was zu Verzerrungen führen kann – insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen, die über eingeschränkte Ressourcen für datenbasierte Analysen verfügen.

4.2 Zukünftige Forschungsaspekte

Vor diesem Hintergrund ergeben sich vielfältige Möglichkeiten für weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen. Besonders lohnend wäre eine empirische Untersuchung der Anwendung des Technology-Canvas in verschiedenen Branchen und Unternehmensgrößen, um dessen Wirkung systematisch zu evaluieren.

Nicht zuletzt wäre die Entwicklung eines digitalen Werkzeugs denkbar, das den Technology-Canvas als interaktives, datengestütztes Analyseinstrument implementiert und mit externen Datenquellen verbindet, um fundiertere Entscheidungen in Echtzeit zu ermöglichen.

Literatur

- [ANF16] AGOSTINI, L., NOSELLA, A., & FILIPPINI, R.: Towards an integrated view of the ambidextrous organization: A second-order factor model. *Creativity and Innovation Management*, 25(1), 129-141, 2016
- [AWS12] ARDILIO, A., WARSCHAT, J., & SPATH, D.: Customized Technology Readiness: Introducing the application specific technology readiness model, 2012 Proceedings of PICMET '12: Technology Management for Emerging Technologies, 1260-1272.
- [Ble97] BLEICHER, K.: Marketing im Spannungsfeld von Wettbewerbs- und Potentialorientierung. Marktorientierte Unternehmensführung: Reflexionen—Denkanstöße—Perspektiven, 37-55, 1997
- [BMF25-ol] Digitales Zentralbankgeld und der digitale Euro - Monatsbericht des BMF - April 2023; https://www.bundesfinanzministerium.de/Monatsberichte/2023/04/Inhalte/Kapitel-3-Analysen/3-1-digitales-zentralbankgeld-und-digitaler-euro-pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1 abgerufen am 10. Juni 2025
- [Cha25-ol] CHATGPT: Einführung in Deep Research. www.ChatGPT.com, 2025, abgerufen am: 10. 4. 2025
- [CSH03] CAMPBELL, D., STONEHOUSE, G., & HOUSTON, B.: Analysis of the macroenvironment. In *Business Strategy* (S. 115-128), Routledge, 2003
- [CW06] CARLSON, C. R.; WILMOT, W. W.: *Innovation – The Five Disciplines for Creating What Customers Want*. Crown Business, New York, 2006
- [Cza01] CZARNITZKI, D. Die Auswirkungen der Forschungs- und Technologiepolitik auf die Innovationsaktivitäten ostdeutscher Unternehmen. *Journal of Contextual Economics – Schmollers Jahrbuch*, 121(4), 539-560, 2001 <https://doi.org/10.3790/schm.121.4.539>
- [Dav23] DAVALAS, A.: The importance of the tam-sam-som model and how big data and ai help, *International Journal of Social Science and Economic Research*, 8(12), 3936-3944, 2023
- [DHD+24] DATHE, T., HELMOLD, M., DATHE, R., DATHE, I.: Corporate Strategy. In: *Implementing Environmental, Social and Governance (ESG) Principles for Sustainable Businesses. Responsible Leadership and Sustainable Management*. Springer, 2024, https://doi.org/10.1007/978-3-031-52734-0_5
- [DPM25-ol] DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT: Patente - Eine Informationsbroschüre zum Patentschutz; https://www.dpma.de/docs/dpma/veroeffentlichungen/2/bro_patente_dt.pdf, abgerufen am 12. Juni 2025
- [EEA23-ol] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (Hrsg.): Environmental statement 2023, EEA Report 10/2024. EEA, 2023, abgerufen am 13. Juni 2025 - doi: 10.2800/7636500

[Eur23a-ol] EUROPEAN PARLIAMENT, COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION: Ein Industrieplan zum Grünen Deal für das klimaneutrale Zeitalter - MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN EUROPÄISCHEN RAT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN, Brüssel, 2023, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023DC0062>, abgerufen am 15. Juni 2025

[Eur24-ol] EUROPEAN PARLIAMENT, COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION: Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations (EC), Brüssel, 2024, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401689&qid=1750091494577, abgerufen am 15. Juni 2025

[EU25-ol] About TECHNOLOGY READINESS LEVELS - Why using TRLs?; <https://euraxess.ec.europa.eu/career-development/researchers/manual-scientific-entrepreneurship/major-steps/trl>; abgerufen am 13.6. 2025;

[EHK+02] EVERSHIM, W., HACHMÖLLER, K., KNOCHE, M. AND WALKER, R.: Vorsprung durch richtige Technologieentscheidungen, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, vol. 97, no. 5, 2002, pp. 251-253. <https://doi.org/10.3139/104.100539>

[Fin09] FINK, S.: Strategische Kommunikation für Technologie und Innovationen. In: Zerfaß, A. (Hrsg.): Kommunikation als Erfolgsfaktor im Innovationsmanagement – Strategien im Zeitalter der Open Innovation. Gabler, Wiesbaden, 2009

[FR08] FENN, J.; RASKINO, M.: Mastering the Hype Cycle – How to Choose the Right Innovation at the Right Time. Harvard Business Press, Cambridge, 2008

[Fre10] FREEMAN, R. E.: Strategic management: A stakeholder approach. Cambridge university press, Cambridge, 2010

[Gal23-ol] GALLUP (Hrsg.): State of the Global Workplace Report. Gallup Inc., Washington D.C., 2023, <https://www.gallup.com/workplace/349484/state-of-the-global-workplace.aspx>, abgerufen am 16. Juni 2025

[GFC20] GASSMANN, O., FRANKENBERGER, K., CHOUDURY, M.: Geschäftsmodelle entwickeln: 55 innovative Konzepte mit dem St. Galler business model navigator. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, München, 2020

[GK06] GASSMANN, O., KOBE, C.: Management von Innovation und Risiko: Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen. Springer Science & Business Media, Wiesbaden, 2006

[GPW23] GAUSEMEIER, J.; PLASS, C.; WENZELMANN, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensführung – Strategien, Geschäftsprozesse und Informationssysteme frühzeitig ausrichten. Carl Hanser Verlag, München, 3. Auflage, 2023.

[Gri05] GRIENITZ, V.: Technologie-Scorecards als Baustein der strategischen Technologiefrühaufklärung im Prozess der strategischen Technologieplanung. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung. 2005

[Gri24] GRIENITZ, V.: Monitoring & Roadmapping von Zukunftsszenarien mit Szenario-Lackmus-Test; in: Dumitrescu, R., & Hözlle, K. (2024). Tagungsband 18. Symposium Vorausschau und Technologieplanung, 2024

[HL00] HERSTATT, C.; LETTL, C.: Management von technologiegetriebenen Entwicklungsprojekten. TUHH Universitätsbibliothek, 2000

[HL04] HERSTATT, C.; LETTL, C.: Management of “technology push” development projects. International Journal of Technology Management, (27), 2004

[HR21] HOFFMANN-RIEM, W.: Recht als Rahmen und Anreiz für Innovation, In: Blättel-Mink, B., Schulz-Schaeffer, I., Windeler, A. (eds) Handbuch Innovationsforschung. Springer VS, Wiesbaden, 2021, https://doi.org/10.1007/978-3-658-17668-6_61

[Küp20] KÜPPERS, B.: Business-Know-how für Gründer - Geschäftserfolg in der Start-up-Szene, Schäffer-Poeschel, Freiburg: 2020

[KMW+18] KOBOS, P. H., MALCZYNSKI, L. A. WALKER, L. N., BORNS, D. J., KLISE, G. T.: Timing is everything: A technology transition framework for regulatory and market readiness levels, Technological Forecasting and Social Change, Volume 137, Pages 211-225, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.07.052>

[Kre15] KREUTZER, R.: Der Gartner Hype Cycle als prognostischer Hintergrund. In: Digitale Revolution. essentials. Springer Gabler, Wiesbaden, 2015, https://doi.org/10.1007/978-3-658-09394-5_2

[Lau09] LAUBE, T.: Methodik des interorganisationalen Technologietransfers ein Technologie-Roadmap-basiertes Verfahren für kleine und mittlere technologieorientierte Unternehmen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2009

[Laz89] LAZERTE, J. D.: Market Pull/Technology Push. Research-Technology Management, (32)2, 1989

[LBK05] LEIMEISTER, J. M.; BÖHMANN, T.; KRCMAR, H.: IT-Unterstützung bei der Innovationsentwicklung, In: Albers, S., Gassmann, O. (eds) Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2005

[LKR+23] LANG-KOETZ, C., REISCHL, A., FISCHER, S., WEBER, S., KUSCH, A.: Ambidextres Innovationsmanagement in KMU: Praxisnahe Konzepte und Methoden (p. 138). Springer Nature, 2023

[Man09] MANKINS, JOHN C. (2009). Technology readiness and risk assessments: A new approach, *Acta Astronautica*. Nov-Dec, 2009, Vol. 65 Issue 9-10, p1208, 8 p., Elsevier, 2009

[MAW97] MITCHELL, R. K.; AGLE, B. R.; WOOD, D. J.: Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience. *Academy of Management Review*, Band 22, Nr. 4, S. 853–886, Academy of Management, Briarcliff Manor, 1997.

[MHB16] MAIER, M. A.; HOFMANN, M.; BREM, A.: Technology and trend management at the interface of technology push and market pull. *International Journal of Technology Management*, 2016

[MSL23] MÜLLER-STEWENS, G.; LECHNER, C.: Strategisches Management – Wie strategische Initiativen zum Wandel führen. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 6. Auflage, 2023.

[MR07] MOWERY, D. C.; ROSENBERG, N.: Paths of Innovation – Technological Change in 20th-Century America. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

[MWG21] MANGELSDORF, A.; WITTENBRINK, N.; GABRIEL, P.: Regulierung und Zertifizierung von KI in der Industrie: Ziele, Kriterien und Herausforderungen. In: Digitalisierung souverän gestalten II. Springer Vieweg, Berlin, 2021.

[OEC24] OECD (Hrsg.): Economic Outlook Q1/2024. OECD Publishing, Paris, 2024.

[OH11] OLIVEIRA, P.; VON HIPPEL, E.: Users as service innovators – The case of banking services. *Research Policy*, 40(6), Elsevier, Amsterdam, S. 806–818, 2011.

[OP11] OSTERWALDER, A., PIGNEUR, Y.: Business Model Generation: Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer. Campus Verlag, 2011.

[OPB+15] OSTERWALDER, A., PIGNEUR, Y., BERNARDA, G., SMITH, A.: Entwickeln Sie Produkte und Services, die Ihre Kunden wirklich wollen. Beginnen Sie mit Value proposition design. Campus-Verlag, Frankfurt am Main/New York, 2015

[Pop08] POPPER, R.: Foresight Methodology. *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice*. 1. ed. Cheltenham : Edward Elgar, 2008

[Por91] PORTER, A. L.: Forecasting and management of technology (Vol. 18). John Wiley & Sons, 1991

[SW99] SCHMALEN, H., WIEDEMANN, C.: Erfolgsdeterminanten von Neuprodukten deutscher Hochtechnologie-Unternehmen. In: *Innovation und Investition. Zeitschrift für Betriebswirtschaft Ergänzungsheft 1/99*, vol 1. Gabler Verlag. 1999, https://doi.org/10.1007/978-3-322-86550-2_4

[Sch25-ol] SCHMALZRIED, G.: “Deep Research”: Welche KI recherchiert am besten? www.BR24.de, 2025, abgerufen am: 10. 4. 2025

[Tee18] TEECE, D. J.: Business models and dynamic capabilities. *Long range planning*, 51(1), 40-49, 2018

[Tro93] TROMMSDORFF, V.: Erfolgsfaktorenforschung über Produktinnovationen. In: Meyer-Krahmer, F. (eds) Innovationsökonomie und Technologiepolitik. Technik, Wirtschaft und Politik, vol 1. Physica, Heidelberg. 1993. https://doi.org/10.1007/978-3-662-12072-9_7

[Tro21] TROTT, P.: Innovation Management and New Product Development. Pearson, 7. Auflage, Harlow, 2021.

[vLP+25] VAN DER LEE M., PETERS C., VAN BERLO M. ET AL.: A holistic framework for assessing the uptake potential of EU-funded security research and innovation project results [version 1; peer review: 2 approved with reservations]. Open Res Europe 2025, 5:115 (<https://doi.org/10.12688/openreseurope.19711.1>)

[VMS21] VIK, J., MELÄS, A. M., STRÄTE, E. P., SØRAA, R. A.: Balanced readiness level assessment (BRLa): A tool for exploring new and emerging technologies., Technological Forecasting and Social Change, Volume 169, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120854>.

[WGP13] WALL, M.; GAUSEMEIER, J.; PEITZ, C.: Technology push-based product planning - future markets for emerging technologies. International Journal of Technology Marketing, (8)1, 2013

[WGS22] WURSTER, K.; GEISSDOERFER, M.; SCHWEIKERT, L.: Circular Business Models: A Review of Definitions, Typologies, and Tools. Journal of Cleaner Production, Ausgabe 368, Elsevier, Amsterdam, 2022.

[Wit19] WITZEL, I. (2019). Theoretischer Forschungsstand: Einbindung von Stakeholdern in Innovationsprozessen und gesellschaftliche Verantwortung von Unternehmen. In: Corporate Responsibility Innovationen und Stakeholderkommunikation. Wirtschaftsethik in der globalisierten Welt. Springer VS, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-23224-5_2

[Wun24] WUNDER, T.: Transformation. In Toolbox Strategie und Nachhaltigkeit (pp. 155-198). Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2024

[Zer09] ZERFAß, A. (Hrsg.): Kommunikation als Erfolgsfaktor im Innovationsmanagement – Strategien im Zeitalter der Open Innovation. Gabler, Wiesbaden, 2009

[ZS23] ZURAWSKI, J.; SCHOPF, J.: National Institute of Standards and Technology Requirements (Analysis Report), 2023

Autor

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Grienitz studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Paderborn. Unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier promovierte er 2004 zum Thema Technologieszenarien. 2015 habilitierte er an der Universität Siegen zum Thema Integrierte szenariobasierte Produkt- und Produktionssystementwicklung – Ein Beitrag zum Systems Engineering. Nach 7 Jahren in einer Unternehmensberatung war er 6,5 Jahre Juniorprofessor an der Universität Siegen und gründete dort das Automotive Center Südwestfalen – acs. In den weiteren 7 Jahren leitete er die Abteilung Innovationsmanagement bei einem globalen Automobilzulieferer. Nachdem er Geschäftsführer der „Neuen Mobilität Paderborn“ war, ging er zurück in die Hochschulwelt nach Aalen für die Professur Startup Management. Seit 2024 ist er Professor für Digitalisierung in Gesellschaft und Technik an der Hochschule Wismar. Sein Forschungsschwerpunkt liegt in der Szenariotechnik und Digitalisierung und Automatisierung der Pflege im ländlichen Raum.

Session VI

Playful Machines – Der Einfluss von Verspieltheit auf die Ideenfindungsleistung von Large Language Models

Theresa S. Kranzle¹

¹ University of Bremen – Institute of Project Management and Innovation,
theresa.kranzle@innovation.uni-bremen.de

Zusammenfassung

Language Models (LLMs) haben bemerkenswerte Fähigkeiten in verschiedenen Innovationskontexten gezeigt, insbesondere bei der kreativen Ideenfindung. Diese Modelle, die durch Prompts gesteuert werden, zeichnen sich dadurch aus, dass sie in kurzer Zeit große Mengen an Ideen generieren können – und das mit einer Originalität, die der menschlichen Ideenfindung vergleichbar ist. Allerdings mangelt es den von LLMs generierten Ideen häufig an Vielfalt und kontextueller Nuancierung, insbesondere bei offenen oder komplexen kreativen Herausforderungen. Diese Einschränkung ergibt sich aus den statistischen Optimierungsprozessen der Modelle, die vorhersagbare gegenüber explorativen Ausgaben bevorzugen. Verspieltheit – gekennzeichnet durch Humor, Spontaneität und kognitive Flexibilität – hat sich beim Menschen als förderlich für Kreativität erwiesen, da sie divergentes Denken anregt und kognitive Einschränkungen überwindet. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen gehen wir der Frage nach, ob spielerische Elemente in der Prompt-Gestaltung auch die kreative Leistung von LLMs verbessern können. In einem experimentellen Design werden zwei Prompt-Bedingungen miteinander verglichen: ein Standardprompt und eine Variante mit gezielten spielerischen Interventionen wie Gamification und Improvisationsdialogen. GPT-03 generiert in beiden Bedingungen je 100 Ideen zu einer praxisnahen Fragestellung. Die Ideen werden in zwei Dimensionen ausgewertet: (1) funktionale Kreativität anhand der Creative Solution Diagnosis Scale (CSDS) sowie (2) kreative Denkfähigkeit, gemessen über semantische Metriken zu Flexibilität und Originalität. Während sich bei der funktionalen Kreativität keine signifikanten Unterschiede zeigten, führte die spielerische Prompt-Gestaltung zu einer signifikant höheren semantischen Flexibilität und zu einem tendenziellen Anstieg der Originalität. Die Ergebnisse legen nahe, dass spielerische Prompts das divergente Denkverhalten von LLMs fördern, indem sie eine breitere konzeptuelle Exploration anstoßen, ohne die Anwendbarkeit der Ideen zu beeinträchtigen. Damit leistet die Studie einen Beitrag zum Verständnis und zur praktischen Nutzung von Mensch-Maschine-Interaktionen im Innovationsmanagement, insbesondere im Bereich der Kreativitätsforschung, sowie zum wachsenden Feld des Prompt Engineerings.

Schlüsselworte

Künstliche Intelligenz, Large Language Models, Kreative Ideenfindung, Mensch-KI-Innovation, KI-Innovationsmethoden, Prompt Engineering, Kognitive Rahmung, Mensch-Maschine-Interaktionen, Computerbasierte Kreativität, Divergentes Denken

Playful Machines – The influence of playfulness on the idea generation performance of large language models

Abstract

Large Language Models (LLMs) such as GPT-03 have shown impressive capabilities in innovation context, including creative ideation. However, the ideas generated by LLMs often limited conceptual diversity and nuance, especially for open-ended or complex creative challenges. This limitation results from the models' statistical optimization processes, which favor predictive over exploratory outputs. Drawing from research on human creativity, this study explores whether playfulness, a cognitive state linked to enhanced flexibility, humor, and imaginative exploration, can be operationalized in prompt design to improve LLM creativity.

We conducted a between-subjects experiment comparing a control prompt to a playfulness treatment prompt across 200 GPT-03-generated ideas for a real-world task involving organizational agility in creative teams. The treatment included structured interventions, such as metaphor-based gamification and improvisational dialogue, designed to simulate a state of play. Outputs were evaluated on two fronts: (1) *functional creativity*, using the Creative Solution Diagnosis Scale (CSDS), and (2) *creative thinking capabilities*, assessed through semantic metrics of flexibility and originality.

While no statistically significant differences between conditions were found in functional creativity, the playful prompt led to a significantly higher level of semantic flexibility ($p = .008$) and a marginal increase in originality ($p = .057$). These results suggest that playfulness interventions enhanced the model's creative thinking capabilities, without compromising functional creativity. The study offers valuable insights into the design and use of human–machine interactions in innovation management, particularly within the domain of creativity research.

Keywords

Intelligence, Large Language Models, Creative Ideation, Human–AI Innovation, AI Innovation Methods, Prompt Engineering, Cognitive Framing, Human–Machine Interactions, Computational Creativity, Divergent Thinking

1 Einleitung

Generative künstliche Intelligenz (GAI), insbesondere Large Language Models (LLMs), zeigt bemerkenswerte Fähigkeiten in verschiedenen Innovationskontexten, einschließlich der Ideengenerierung [HH23], [MGN+24] und -bewertung [BPT+24], [JSF+24], [HB24]. Mit Hilfe von Prompts können LLMs schnell große Mengen an Ideen produzieren, die in ihrer Originalität mit menschlichen Ideen vergleichbar sind [HH23]. Diese Fähigkeit macht LLMs zu vielversprechenden Werkzeugen für die Unterstützung von Innovationsprozessen in der Frühphase, wie z. B. der Ideenfindung.

Trotz ihrer Potenziale sind LLMs durch die stochastische Natur ihrer generativen Prozesse limitiert. Insbesondere bei offenen oder komplexen Aufgaben greifen sie häufig auf vertraute oder konvergente Ausgabemuster zurück, wodurch die konzeptionelle Vielfalt begrenzt wird [MGN+24], [HFW+24]. Diese Einschränkung ist besonders relevant bei Ideenfindungsaufgaben, die auf divergenterem Denken beruhen – der Fähigkeit, mehrere, unterschiedliche und originelle Lösungen für ein bestimmtes Problem zu finden [Gui68], [Tor95]. Ohne systematische Interventionen besteht daher das Risiko, dass LLMs den Problemlösungsraum verengen.

Verspieltheit, gekennzeichnet durch Humor, Spontaneität und kognitive Flexibilität [MBL24], ist eine vielfach untersuchte Triebkraft für menschliches kreatives Denken [MR06], [WHC17], [MBL24]. Verspieltheit erleichtert mehrere kognitive Prozesse, die für die Kreativität wesentlich sind, darunter die Umgestaltung von Problemen, mentale Transformationen und die Erzeugung neuer Assoziationen. Zwar besitzen LLMs kein Bewusstsein oder emotionale Zustände im eigentlichen Sinne, sie reagieren jedoch sensibel auf die Formulierung und sprachliche Struktur von Prompts. Dies eröffnet die Möglichkeit, dass Verspieltheit, wenn es in die Gestaltung von Prompts eingebettet wird, als kognitiver Proxy dienen kann, der eine kreativere Ideengenerierung fördert.

Wir stellen daher folgende Forschungsfrage: Wie wirken sich spielerische Interventionen auf die Fähigkeit zur Ideengenerierung von GPT-Modellen aus? Um diese Frage zu beantworten, wenden wir ein experimentelles Design an, bei dem GPT-o3 aufgefordert wird, eine standardisierte Ideenfindungsaufgabe unter zwei Bedingungen auszuführen: einem Kontrollprompt und einem spielerisch gestalteten Prompt. Wir bewerten die Ergebnisse des Modells anhand von zwei komplementären Bewertungsansätzen: (1) funktionale Kreativität, bewertet mit der Creative Solution Diagnosis Scale (CSDS), und (2) kreative Denkfähigkeiten, operationalisiert durch semantische Maße für Flexibilität und Originalität. Es zeigt sich, dass die Verspieltheit zwar keinen signifikanten Einfluss auf die funktionale Kreativität hat, aber die kreativen Denkfähigkeiten des LLMs steigert. Diese Erkenntnis bietet neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Interaktion zwischen Menschen und Maschinen im Innovationsmanagement.

2 Theoretischer Rahmen

Um diese Forschungsfrage systematisch zu beantworten, entwickeln wir zunächst einen theoretischen Rahmen, der die kognitiven Grundlagen der Ideengenerierung und die Rolle der Verspieltheit als kreativitätsfördernden Faktor beleuchtet.

Ideengenerierung bezieht sich auf die bewusste Erarbeitung einer Reihe nützlicher und neuartiger Lösungen für ein Problem und stellt ein Kernelement des kreativen Ideenfindungsprozesses dar [Ama97], [Sha03]. In Design- und Innovationsprozessen bildet die Ideengenerierung in der Regel die frühe Stufe der Umwandlung eines identifizierten Problems in eine Lösung [FMP24] (siehe Bild 1). Ein weit verbreitetes Modell zur Strukturierung dieses Prozesses ist das Doppel-Diamant-Modell [FMP24], dass zwei wichtige Denkzyklen erfasst: divergent und konvergent.

Der erste Diamant befasst sich mit dem Problemraum (Erkundung und Definition des Problems), während sich der zweite Diamant auf den Lösungsraum (Entwicklung und Verfeinerung von Ideen) konzentriert. Diese Studie fokussiert auf den Lösungsraum. In der Anfangsphase jedes Diamanten dominiert das divergente Denken. Dieses eröffnet nicht nur ein breites Spektrum von Möglichkeiten, seien es Problemoptionen oder Lösungsideen, sondern strebt gezielt die Entwicklung von Ideen mit höherem Kreativitätspotenzial an [Ban13]. Die Darstellung des divergenten Denkens bezieht sich dabei sowohl auf die Quantität der generierten Ideen als auch auf deren qualitative Vielfalt und Originalität. Es folgt konvergentes Denken, das die Bewertung, Auswahl und Verbesserung der Optionen ermöglicht [TC10], [Run10].

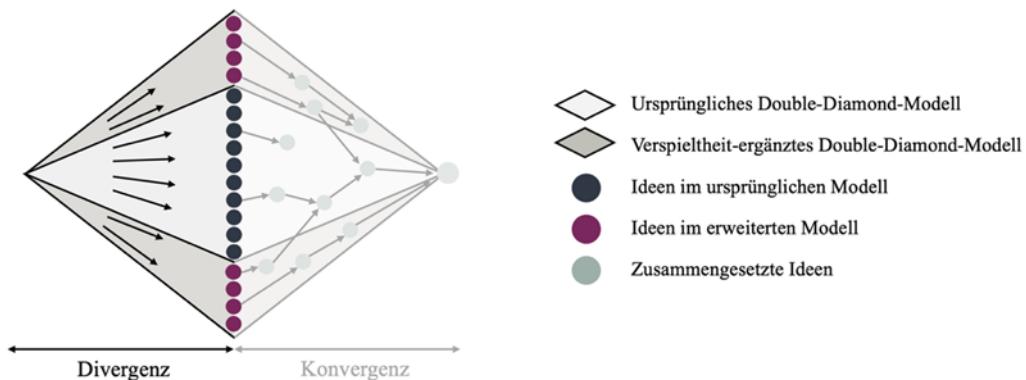


Bild 1: LLM-erweiterter Doppel-Diamant der Ideenfindung [FMP24, S. 4]

Aus kognitiver Sicht ist die Ideenfindung eine komplexe, integrierte Handlung, die sich im Wesentlichen auf zwei kognitive Prozesse stützt, um neuartige und nützliche Ergebnisse zu erzielen: divergentes Denken und mentale Transformationen [MR06]. Divergentes Denken bezieht sich auf die Generierung einer Vielzahl von Ideen aus einem einzigen Stimulus oder Problem [Gui68]. Es beinhaltet Ideenreichtum (viele Ideen produzieren), Ideenflexibilität (zwischen verschiedenen Ansätzen wechseln), Originalität (Ideen produzieren, die von den üblichen Antworten abweichen) sowie Elaboration (Ideen mit Details erweitern oder verfeinern) [Tor95], [SO99], [MR06]. Konvergentes Denken hingegen ermöglicht die Verfeinerung und Auswahl machbarer Lösungen [Run10]. Mentale Transformationen unterstützen diesen Prozess, indem sie vorheriges Wissen in neue konzeptionelle Formen umwandeln [WSF99]. Diese Umwandlungen werden durch kognitive Mechanismen wie Assoziation, Bilder, Metapher und Analogie

gesteuert [Gui68], [WSF99]. Nach dem Modell des assoziativen Gedächtnisses entsteht Kreativität, wenn Individuen entfernte semantische Kategorien aktivieren und verbinden, um neue Assoziationen zu bilden [SC12].

Dieser theoretische Rahmen gliedert sich in zwei zentrale Bereiche: Im nachfolgenden Abschnitt wird der aktuelle Forschungsstand zur Ideengenerierung mit LLMs betrachtet, um die spezifischen Potenziale und Limitationen dieser Technologie zu verstehen (Abschnitt 2.1). Anschließend wird Verspieltheit definiert und analysiert, wie sie kreative Leistung von LLMs verbessern kann (2.2).

2.1 Ideengenerierung mit LLMs

Ideengenerierung wird als komplexe, kognitive Handlung angesehen, die sowohl von menschlicher als auch von künstlicher Kognition ausgeführt werden kann [SMG+22]. In der Praxis hat die jüngste Forschung gezeigt, dass LLMs, insbesondere solche mit Transformator-Architekturen, über beträchtliche kreative Fähigkeiten verfügen [LCP+24]. Dies zeigt sich beispielsweise beim kreativen Schreiben in englischer Sprache [GW23] oder bei der Generierung alternativer Verwendungsmöglichkeiten für gewöhnliche Objekte [SSB+22]. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass LLMs nicht nur in der Lage sind, Texte zu generieren, sondern sich auch in Aufgaben bewähren, die imaginative Rekombination und konzeptionelle Neuartigkeit erfordern.

Im spezifischen Kontext der Ideenfindung erweitern BOUSCHERY, BLAZEVIC UND PILLER das Doppel-Diamant-Modell durch die Integration von LLMs und stellen die These auf, dass diese Modelle sowohl divergente als auch konvergente Phasen verbessern können [BBP23]. Ihrer Ansicht nach erhöhen LLMs in der divergenten Phase Menge und Vielfalt der Ideen, während sie in der konvergenten Phase helfen, konzeptionelles Verständnis zu verfeinern und zu erweitern. Ergänzend zu diesem theoretischen Modell deuten empirische Studien darauf hin, dass Modelle wie GPT-4 Ideen produzieren können, die in Sprachfluss und Originalität mit menschlichen Ideen vergleichbar sind [HH23], [MGN+24]. Diese Fähigkeit ergibt sich aus der Nutzung umfangreicher Trainingsdatensätze, wodurch diese Modelle Wissen aus verschiedenen Bereichen rekombinieren können. Dies verleiht ihnen besondere Effektivität bei schnellen Ideenfindungsaufgaben [MGN+24].

Ungeachtet ihrer Fähigkeiten in Geläufigkeit, Skalierbarkeit und Zugang zu umfangreichem Wissen weisen LLMs Einschränkungen im Hinblick auf die kreative Ideengenerierung auf. Ein wiederkehrendes Problem ist ihre Tendenz, Ergebnisse zu produzieren, die repetitiv, vorhersehbar oder übermäßig konventionell sind. Dieses Problem ergibt sich aus ihrer Angewiesenheit auf Mustervervollständigung [HFW+24], [LP24]. Studien haben gezeigt, dass LLMs oft Ideen mit begrenzter Neuheit und hoher paarweiser Ähnlichkeit generieren, insbesondere unter Few-Shot-Prompting-Bedingungen, was zu einem engen Lösungsraum führt [MGN+24]. Ohne strukturierte Anweisungen fällt es LLMs zudem schwer, Ideen in einen Kontext mit domänen-spezifischem Wissen zu stellen oder die progressive Argumentation zu simulieren, die typischerweise bei menschlicher Ideenfindung zum Tragen kommt [LXG+24]. Diese Einschränkungen unterstreichen die Notwendigkeit von Maßnahmen, die LLMs über ihre Standardmuster hinaus fördern und kreativeres, divergentes Denken unterstützen.

Um diese Einschränkungen zu überwinden, experimentiert eine zunehmende Zahl von Studien mit Methoden zur positiven Beeinflussung von LLMs im Ideengenerierungsprozess. Diese Ansätze erforschen oft strukturierte Interventionen auf Promptebene, wie etwa die Zuweisung verschiedener Rollen an mehrere LLM-Agenten, um unterschiedliche Perspektiven zu simulieren und die Ideenvielfalt zu erhöhen [LCP+24], oder den Vergleich von Zero-Shot- und Few-Shot-Prompting-Strategien, um deren Auswirkungen auf Neuartigkeit und Qualität der Ergebnisse zu bewerten [MGN+24]. Andere Ansätze greifen auf Systemebene ein und bereichern die Ideenfindungsfähigkeiten von LLMs durch iterative Abfrage externen Wissens [HFW+24] oder organisieren wissenschaftliche Literatur in strukturierten Denkketten (Chain of Thought), die menschliche Forschungslogik widerspiegeln [LXG+24].

2.2 Verspieltheit – Ein Förderer der Kreativität

Aufbauend auf diesem Verständnis der LLM-Fähigkeiten analysieren wir anschließend das Konzept der Verspieltheit und dessen theoretische Grundlagen als Kreativitätsförderer. Verspieltheit wird sowohl als Eigenschaft als auch als Zustand konzeptualisiert. Als Eigenschaft spiegelt sie eine Persönlichkeitsneigung wider, Aktivitäten mit Freude anzugehen und Aufgaben neu zu gestalten, um Vergnügen und Kreativität zu steigern [GW92], [WHC17]. Als Zustand entsteht Verspieltheit durch kontextuelle Einflüsse und ist durch freiwillige, lustige, fantasievolle und strukturierte Verhaltensweisen gekennzeichnet [Wes16].

Spielen ist jedoch mehr als eine Reihe von Aktivitäten; es stellt eine Verhaltensorientierung dar, die durch zeitlich-räumliche Grenzen, ein Gleichgewicht von Freiheit und Zwang, flexible Mittel-Zweck-Beziehungen und positive Gefühle definiert ist [MR06]. Diese Bedingungen bilden zusammen einen sicheren „Spielplatz“ für experimentelle Ideenfindung [MR06]. In Organisationen und Teams verbessern spielerische Ansätze die Ideenfindung, indem sie psychologische Sicherheit fördern und kognitive Beschränkungen reduzieren [WHC17]. Diese Mechanismen fördern bei Menschen die Risikobereitschaft und Erkundung unkonventioneller Ideen, die für innovative Problemlösungen unerlässlich sind [Pay20].

Der Zustand des Spielens ist eine gut dokumentierte Triebkraft der Kreativität [Pay20], [MBL24], [MR06]. Frühe Theoretiker, darunter FREUD, sahen im Spiel einen natürlichen Weg zum erfinderischen Denken [Fre26]. Spätere empirische Studien bestätigen, dass Spielen die kreative Leistung sowohl bei Kindern als auch bei Erwachsenen steigert [RG90], [Dan99]. Auf kognitiver Ebene fördert Spiel mehrere Prozesse, die für die Ideenfindung zentral sind, darunter divergentes Denken, intrinsische Motivation, mentale Transformationsprozesse und kognitive Flexibilität [Dan99], [Run99], [MR06]. Diese kognitiven Prozesse verbessern die Fähigkeit, neuartige und unerwartete Verbindungen zu schaffen, und machen Spiel zu einem wirksamen Instrument zur Förderung von Kreativität und kreativer Ideenfindung in komplexen Kontexten [BM13], [WHC17], [SGK+25].

Im Kontext von LLMs kann Spielen als Intervention auf Promptebene dienen, die das Modell zu kreativerem Denken und kreativeren Ergebnissen anregt. Obwohl LLMs Verspieltheit nicht als psychologischen Zustand erleben, sind sie sehr sensibel für sprachliche Gestaltung und rhetorische Hinweise. In Prompts eingebettete spielerische Impulse sollten daher die Standardten-

denz des Modells zu vorhersehbaren Mustern aufbrechen, wodurch neue Lösungsräume erkundet werden können [HH23], [MGN+24]. Indem sie einen spielerischen Zustand simulieren, sollen spielerische Prompts möglicherweise die semantische Streuung (Flexibilität) und die Generierung außergewöhnlicher Antworten (Originalität) erhöhen.

3 Methode

Basierend auf diesem theoretischen Fundament wurde das empirische Vorgehen zur Untersuchung spielerischer Interventionen in der LLM-basierten Ideengenerierung entwickelt. Um die Auswirkungen von Prompts mit spielerischen Interventionen auf die Ideengenerierung von LLMs zu untersuchen, führen wir eine experimentelle Studie durch. Im Folgenden stellen wir das experimentelle Design (Abschnitt 3.1), die Operationalisierung der Variablen (Abschnitt 3.2), einschließlich des Promptdesigns, und die Durchführung des Versuchs (Abschnitt 3.3) vor.

3.1 Experimentelles Design

Diese Studie verwendet ein experimentelles Design, um den Einfluss spielerischer Interventionen auf die Ideengenerierungsfähigkeiten von GPT-o3 zu untersuchen. Die Wahl von GPT-o3 erfolgte aufgrund seiner fortgeschrittenen „Reasoning“-Fähigkeiten, die für komplexe Ideenfindungsaufgaben besonders geeignet sind. Wir verwenden zwei Gruppen: Experimental und Kontrolle. Das GPT-o3-Modell wird aufgefordert, Ideen für eine reale Aufgabe zu generieren. In beiden Fällen wurde dieselbe Aufgabe gestellt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Sie bestand darin, neuartige, praktische und umsetzbare Ideen zu entwickeln, die einer Grafikdesign-Agentur helfen sollten, ihre Arbeitspraktiken flexibler zu gestalten (siehe Tabelle 1 für die spezifischen Anweisungen). Die Aufgabe wurde aufgrund ihrer Komplexität und Relevanz für organisatorische Innovation ausgewählt. Die generierten Ideen reichten von Standardvorschlägen wie „tägliche Stand-ups einführen“ und „ein digitales Kanban-Board implementieren“ bis hin zu unkonventionelleren Ideen wie „Sprint-Retrospektiven mit Hilfe von Comic-Storyboarding durchführen“ oder „Teammitglieder in wöchentlichen Pairing-Sitzungen interdisziplinär austauschen, um Silos aufzubrechen und gegenseitige Befruchtung zu fördern.“

3.2 Variablen

Nachdem das grundlegende experimentelle Design dargelegt wurde, erläutern wir im Folgenden die spezifische Operationalisierung unserer Variablen. Dabei definieren wir zunächst die unabhängige Variable Verspieltheit und deren Umsetzung in den Prompts, bevor wir die beiden komplementären Ansätze zur Messung der abhängigen Variablen - funktionale Kreativität und kreative Denkfähigkeiten - vorstellen.

Die unabhängige Variable Verspieltheit wurde durch szenariobasierte Prompts operationalisiert, die Zustände von Verspieltheit im generativen Prozess der LLMs simulieren sollten. Der Prompt orientierte sich an etablierten kreativitätsfördernden Spieltechniken. Die spielerischen

Interventionen umfassten Improvisationstechniken [Wes16], spielähnliche Konstrukte [MBL24], achtsames Spiel [Pay20], Metaphern [BM13], Humor und Rollentauschtechniken [MR06].

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Ideengenerierungsprompts

Prompt Element	Experimentalprompt	Kontrollprompt
<i>System</i>	System You are a helpful assistant designed to output JSON.	System You are a helpful assistant designed to output JSON.
<i>Intervention 1</i>	User You're an agile work specialist tasked with designing creative, practical ways to help a graphic design agency boost agility. Picture the agency as a live strategy game. Every agility boost earns XP; bottlenecks are ‘mini-bosses’. Generate five ‘power-up cards’ (title + effect) that players can deploy.	
<i>Intervention 2</i>	User You (GPT-A) have a twin (GPT-B). Play an improvisational “Yes-and” exchange about absurd ways the graphic design agency could improve its agility with your twin. Assistant (GPT-A/B) 6-turn improvisational exchange involving yoga balls, design sprints, origami printers, and more.	
<i>Überleitung</i>	User Great! Now switch back to your most thoughtful self. As an agile work specialist... [repeats same JSON task as control]	
<i>Aufgabe zur Ideengenerierung</i>	User As an agile work specialist, your role is to generate novel, innovative, practical, and actionable ideas to help a graphic design agency effectively become more agile in its work practices. Focus on creating solutions that align with industry standards and the unique dynamics of a creative team. Please provide 10 actionable ideas.	User As an agile work specialist, your role is to generate novel, innovative, practical, and actionable ideas to help a graphic design agency effectively become more agile in its work practices. Focus on creating solutions that align with industry standards and the unique dynamics of a creative team. Please provide 10 actionable ideas.
<i>Ausgabeformat</i>	User Format requirements of the 10 ideas:Idea Title + DescriptionTone: clear, concise, presentable to managementExample of the JSON Format{ "id": "0", "Prompt Description": "Control Prompt", "Ideas": [{ "Idea Number": <...>, "Idea Title": "...", "Idea Description": "..." }] }	User Format requirements of the 10 ideas:Idea Title + DescriptionTone: clear, concise, presentable to managementExample of the JSON Format{ "id": "0", "Prompt Description": "Control Prompt", "Ideas": [{ "Idea Number": <...>, "Idea Title": "...", "Idea Description": "..." }] }

Während sowohl der Kontroll- als auch der Experimentalprompt dieselbe Aufgabe stellen, werden in den Experimentalprompt zwei strukturierte spielerische Interventionen vor die Ideengenerierungsaufgabe eingebaut. Sie werden durch eine Kombination von System-, Benutzer- und Assistenznachrichten vermittelt, um eine gestufte, mehrphasige Interaktion mit dem LLM zu simulieren. Die konkrete Umsetzung der spielerischen Ansätze in den Prompts erfolgte folgen-

dermaßen: Bei der ersten Intervention wird die Ideenfindungsaufgabe als Strategiespiel umgestaltet, bei dem die Ideen die Form von „Power-Up-Karten“ mit spielinternen Effekten und XP-Belohnungen annehmen. Dieser metaphorische und spielähnliche Aufbau dient mehreren Funktionen: Er führt ein strukturiertes Spiel ein [BM13], [MR06], fügt intrinsische Motivationsanreize hinzu [Pay20] und fördert flexibles Denken [MBL24]. Die zweite Intervention führt einen improvisierten „Ja-und“-Dialog zwischen zwei LLM-Agenten ein. Jede Antwort greift die vorherige auf und treibt die Ideen schrittweise in größere Absurdität. So entstehen spontane, unvorhersehbare Wendungen, die zwar improvisiert, aber nicht völlig regellos sind. Diese Kombination aus Rollentausch- und Improvisationstechnik fördert Risikobereitschaft und löst starre Assoziationen auf [Wes16] und eröffnet Raum für Humor, was dazu beiträgt, kognitive Beschränkungen zu lockern [MR06]. Beide Interventionen zusammen bilden eine spielerische Basis, von der aus sich das LLM der Ideengenerierungsaufgabe widmen kann. Die Überleitung ("Great! Now switch back to your most thoughtful self") dient als bewusste Rückkehr aus dem Spielzustand und etabliert damit die zeitlich-räumlichen Grenzen des Spiels [MR06], während die spielerischen Impulse für die nachfolgende Ideengenerierung erhalten bleiben.

Als abhängige Variablen untersuchen wir zwei primäre Kategorien, die die generierten Ideen auf verschiedenen Ebenen bewerten. Zum einen untersuchen wir die funktionale Kreativität, die Ideen individuell bewertet, zum anderen die kreativen Denkfähigkeiten, die die Muster des gesamten Ideensets erfassen. Funktionale Kreativität ist definiert als die Entwicklung neuartiger und nützlicher Lösungen für komplexe, wenig strukturierte Probleme [Ama83], [RJ12]. Zur Bewertung setzen wir die Creative Solution Diagnosis Scale (CSDS) ein. Obwohl die CSDS ursprünglich zur Bewertung der Kreativität von Produkten entwickelt wurde, basiert sie auf dem Konzept der funktionalen Kreativität, das sich von ästhetischer Kreativität abgrenzt [CC05]. Da funktionale Kreativität nicht auf physische Produkte beschränkt ist, sondern ebenso für Dienstleistungen, Konzepte und Prozessverbesserungen von Bedeutung ist, eignet sich die CSDS zur Bewertung der in dieser Studie generierten Optimierungsideen. Die 27-Item-Skala erfasst fünf Dimensionen funktionaler Kreativität: Genese (Originalität und Neuartigkeit der Idee), Relevanz und Effektivität (Praktikabilität und Anwendbarkeit der Idee), Problematisierung (das Ausmaß, in dem die Idee bestehende Annahmen neu formuliert oder in Frage stellt), Propulsion (das Potenzial der Idee, das Feld voranzubringen oder das Problem zu lösen) und Eleganz (Einfachheit und Klarheit der vorgeschlagenen Lösung).

Kreative Denkfähigkeiten beziehen sich auf die Reife der kognitiven Prozesse, die Ideengeber zur Erkundung des Lösungsraums einsetzen, insbesondere divergente Denkfähigkeiten. Wir stützen uns auf etablierte Komponenten des divergenten Denkens, wie von TORRANCE mit dem Torrance Test of Creative Thinking (TTCT) definiert [Tor69]. Zu den Hauptdimensionen gehören Ideenreichtum (viele Ideen produzieren), Flexibilität (zwischen verschiedenen Ideenkategorien wechseln), Originalität (Ideen produzieren, die von üblichen Antworten abweichen) und Ausarbeitung (Ideen mit Details erweitern oder verfeinern) [Tor95]. Da der Ideenreichtum in beiden Bedingungen durch das Prompt-Design konstant gehalten wird, wird diese Variable nicht verwendet. Weiterhin schließen wir Elaboration aus der weiteren Analyse aus, da wir insbesondere die divergenten Denkfähigkeiten und nicht das konvergente Denken untersuchen.

3.3 Durchführung

Basierend auf dieser Variablendefinition wird das konkrete Vorgehen bei der Datenerhebung und -analyse beschrieben. Die Durchführung gliedert sich in drei aufeinander aufbauende Schritte, die von der Ideengenerierung über die Bewertung der funktionalen Kreativität bis zur Analyse der kreativen Denkfähigkeiten reichen.

Im ersten Schritt erfolgte die Ideengenerierung mit sowohl dem Experimental- als auch dem Kontrollprompt unter Verwendung des GPT-o3-Modells. Für jede Bedingung generierte das LLM 100 Ideen zu einer standardisierten Aufgabenstellung, wodurch eine robuste Stichprobengröße von 200 Ideen für die vergleichende Analyse sichergestellt wurde. Im Gegensatz zu GPT-4-Modellen verfügt die GPT-o-Serie nicht über Temperatureinstellungen, sondern nutzt den Reasoning-Effort-Parameter zur Steuerung des Denkprozesses. Dieser Parameter bietet drei Einstellungen: niedrig, medium und hoch. Zur Maximierung der Ergebnisvielfalt bei gleichzeitiger Vermeidung von Verzerrungen wählten wir die medium-Einstellung, da diese einen optimalen Kompromiss zwischen kreativer Vielfalt und strukturierter Problemlösung darstellt. Jede Ideengenerierung erfolgte in einem kontextlosen Rahmen, wobei das Modell vor jeder Eingabeaufforderung zurückgesetzt wurde, um Verschleppungseffekte zu vermeiden. Die Ergebnisse wurden als anonymisierter Text gespeichert, um eine unvoreingenommene Auswertung zu gewährleisten.

Im zweiten Schritt wurde die funktionale Kreativität bewertet. Jede der 200 generierten Ideen (100 pro Bedingung) wurde mittels CSDS [CKC11] von GPT-o3 bewertet, wobei ein Prompt verwendet wurde, der neueren Ansätzen folgt [KS25]. Das LLM bewertete jede Idee über alle fünf CSDS-Dimensionen auf einer 5-Punkte-Likert-Skala. Die CSDS-Werte wurden sowohl auf Gesamtkreativitäts- als auch auf Dimensionsebene analysiert. Für den Vergleich der ordinalen Bewertungen kamen Mann-Whitney-U-Tests zum Einsatz, wobei die Effektgrößen über die Rang-Biserial-Korrelation angegeben werden. Zur Validierung der LLM-Bewertung evaluierete ein Fachexperte eine randomisierte Teilstichprobe von 20 Ideen, die ihm anonymisiert und ohne Kenntnis der Versuchsbedingungen vorgelegt wurden. Die Bewertung erfolgte unter Verwendung desselben CSDS-Bewertungsbogens mit identischen Bewertungsanweisungen wie beim LLM-Prompt. Der Experte erhielt ausreichend Zeit für eine gründliche Evaluierung in kontrollierter Umgebung. Die Analyse zeigte eine akzeptable Interrater-Reliabilität zwischen menschlicher und LLM-Bewertung.

Im dritten Schritt erfolgte die Bewertung des kreativen Denkens. Sowohl Flexibilität als auch Originalität werden mithilfe semantischer Embeddings eines vortrainierten Transformationsmodells (all-MiniLM-L6-v2) [RG19] gemessen, das auf den Ideenbeschreibungstext angewendet wird. Die Flexibilität wird als mittlere paarweise Kosinusdistanz zwischen allen Ideen innerhalb jeder Bedingung operationalisiert. Dieses Maß spiegelt wider, wie semantisch gestreut der Ideensatz ist, wobei höhere durchschnittliche Abstände eine größere Flexibilität kennzeichnen. Die Gruppenunterschiede wurden mithilfe eines Permutationstests (1000 Iterationen) bewertet, da die paarweisen Abstände nicht unabhängig voneinander sind. Die Originalität wird als Kosinusdistanz zwischen jeder Idee und dem Zentroid aller Ideen innerhalb ihrer Bedingung berechnet. Damit wird erfasst, wie stark jede Idee von der Norm abweicht, wobei höhere Werte

eine größere Neuheit anzeigen. Die Gruppenunterschiede wurden mit einem Mann-Whitney-U-Test ermittelt.

4 Ergebnisse

Im Folgenden präsentieren wir die Ergebnisse zur funktionalen Kreativität (Abschnitt 4.1) sowie zu den kreativen Denkfähigkeiten (Abschnitt 4.2).

4.1 Funktionale Kreativität

Eine Gesamtzahl von 200 Ideen wurde anhand der fünf Dimensionen funktionaler Kreativität bewertet und zu einem Gesamtwert zusammengefasst. Die in Tabelle 2 aufgeführten deskriptiven Statistiken zeigen, dass beide Gruppen ähnliche Mittelwerte aufweisen. In beiden Gruppen erhielten Relevanz und Effektivität die höchsten Bewertungen, während Propulsion und Genese das untere Ende markieren. In allen CSDS-Dimensionen waren die Bewertungen in der Experimentalgruppe leicht höher, mit dem größten Unterschied bei Propulsion (Mittelwertunterschied von 0,06). Die Mann-Whitney-U-Tests ergaben jedoch keine statistisch signifikanten Unterschiede in allen Dimensionen (alle $p > 0,35$), ebenso waren die Effektgrößen gering (Cohens $d = 0,09$ bis $0,16$).

Tabelle 2: Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests der funktionalen Kreativität

	Kontrollgruppe		Experimentalgruppe		Mann-Whitney U	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD	U-Statistik	p-Wert
<i>Relevanz und Effektivität</i>	3.28	0.14	3.29	0.15	5147.0	0.700
<i>Problematisierung</i>	2.6	0.29	2.63	0.24	5035.5	0.931
<i>Propulsion</i>	1.74	0.39	1.8	0.39	5186.5	0.648
<i>Eleganz</i>	2.87	0.21	2.89	0.23	5355.0	0.368
<i>Genese</i>	1.77	0.43	1.81	0.45	5268.5	0.511
<i>Funktionale Kreativität</i>	2.45	0.22	2.48	0.19	5380.0	0.354

4.2 Kreative Denkfähigkeiten

Um die Ergebnisse zu den kreativen Denkfähigkeiten systematisch darzustellen, betrachten wir zunächst die Flexibilität und anschließend die Originalität der generierten Ideen.

Bezüglich der Flexibilität visualisierten wir die Satz-Embeddings mit t-SNE in Bild 2, um die semantische Struktur der Ideen zu veranschaulichen. Obwohl t-SNE keine globalen Distanzen erfasst, erscheinen die Ideen der Experimentalgruppe verstreuter. Das visuelle Muster deutet auf eine breitere Streuung der Ideen in der Experimentalgruppe hin. Diese Beobachtung wird durch die Analyse der mittleren paarweisen Kosinusdistanzen bestätigt: Die Experimentalgruppe weist eine höhere semantische Flexibilität auf als die Kontrollgruppe (Experimental: $M = 0,839$; Kontrolle: $M = 0,802$). Ein Permutationstest bestätigt die statistische Signifikanz dieses Unterschieds ($p = .008$). Dies belegt, dass die spielerische Intervention eine breitere Exploration des Lösungsraums ermöglicht.

Hinsichtlich der Originalität wurden die Kosinusdistanzen zwischen jeder Idee und dem Zentroid der jeweiligen Gruppe berechnet. Höhere Distanzen deuten auf eine stärkere Abweichung vom Durchschnitt und damit auf höhere Originalität hin. Wie in Bild 3 dargestellt, zeigen beide Gruppen ähnlich geformte Verteilungen. In der Experimentalgruppe ist jedoch eine leichte Rechtsverschiebung mit schmälerer Basis und ausgeprägteren Dichtespitzen erkennbar, was auf eine Tendenz zu größerer Originalität hindeutet (Experimental: $M = 0,71$; Kontrolle: $M = 0,69$). Ein Mann-Whitney-U-Test ergibt einen grenzwertig signifikanten Unterschied ($U = 5778.00$, $p = .057$). Trotz starker Überlappung der Verteilungen treten unter der spielerischen Bedingung weniger konventionelle und etwas mehr originelle Vorschläge auf – ein Hinweis auf einen moderaten Effekt der Intervention.

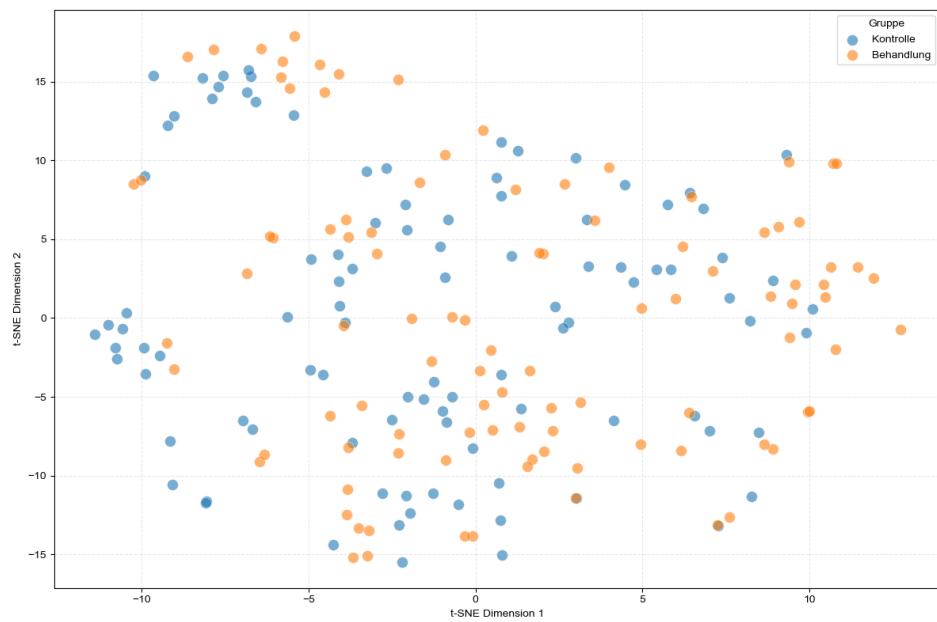


Bild 2: t-SNE Darstellung der Idee-Embeddings

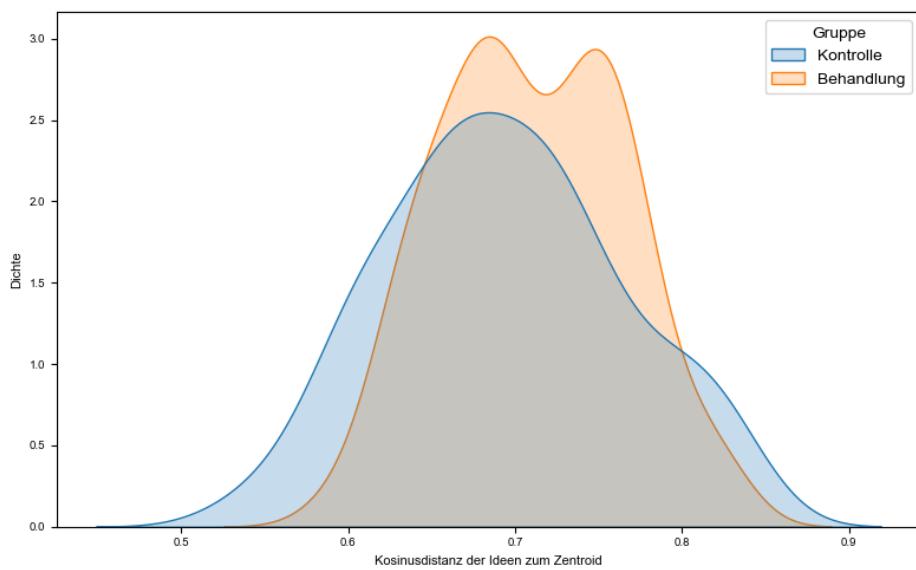


Bild 3: Verteilung der Kosinusdistanz der Ideen zum Zentroid

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Studie wurde untersucht, ob spielerische Interventionen in Prompts die kreative Ideengenerierung von LLMs, insbesondere GPT-o3, fördern können. In Bezug auf die funktionale Kreativität, die die Qualität einzelner Ideen bewertet, zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Experimental- und Kontrollgruppe. Die Analyse der kreativen Denkfähigkeiten auf Ebene des gesamten Ideensets ergab jedoch eine signifikante Zunahme der semantischen Flexibilität sowie eine leichte Steigerung der Originalität. Dies deutet darauf hin, dass spielerische Elemente das divergente Denkverhalten von LLMs positiv beeinflussen können – auch wenn sich dies nicht unmittelbar in funktional kreativere Einzelergebnisse übersetzt. Im Folgenden werden die Befunde im Licht bestehender Theorien und empirischer Arbeiten eingordnet, bevor zentrale Limitationen und Perspektiven für zukünftige Forschung aufgezeigt werden.

Die positive Wirkung spielerischer Interventionen auf das divergente Denken steht im Einklang mit der Kreativitätsforschung am Menschen. Studien zeigen, dass spielerische Zustände, etwa durch Humor, Metaphern oder Rollenspiele, die assoziative Suche erweitern, den Kategorienwechsel fördern und dadurch die kognitive Flexibilität steigern [MR06], [Rus13], [WHC17]. Die beobachtete Zunahme der semantischen Flexibilität bei LLMs legt nahe, dass spielerische Prompt-Gestaltung einen vergleichbaren Effekt erzielen kann, da sie die konzeptuelle Bandbreite der generierten Ideen ohne externes Wissen zu erweitern scheint. Auch der leichte Anstieg der Originalität steht im Einklang mit obigen Ansichten, wonach Spiel eher unoriginelle Antworten reduziert als außergewöhnlich kreative Spitzenleistungen hervorbringt [Dan99]. Zwar zeigte sich keine statistisch signifikante Verbesserung der funktionalen Kreativität, doch ließ sich auch kein negativer Effekt des spielerischen Prompts feststellen. Dies deutet darauf hin, dass eine erweiterte konzeptionelle Exploration erreicht wurde, ohne die funktionale Kreativität der Ideen zu beeinträchtigen. Zugleich unterstreicht dieses Ergebnis die Bedeutung einer getrennten Bewertung beider Dimensionen: funktionale Kreativität auf Ebene der Einzелиdeen und kreative Denkfähigkeiten auf Ebene des gesamten Ideensets.

Im Kontext des Doppel-Diamant-Modells der Ideenfindung [FMP24] deutet der Anstieg von Flexibilität und Originalität darauf hin, dass die spielerische Intervention die divergente Phase innerhalb des Lösungsraums stärkt. Die ausbleibende Verbesserung der funktionalen Kreativität legt hingegen nahe, dass dieser Effekt nicht in die konvergente Phase überging, in der Ideen typischerweise bewertet, verfeinert und anwendungsbezogen ausgestaltet werden. Dieses Ergebnis entspricht der Struktur unseres Experiments: GPT-o3 wurde angewiesen, eine feste Anzahl an Ideen zu generieren, nicht jedoch, diese zu analysieren, auszuwählen oder weiterzuentwickeln. Die Ausgaben spiegeln somit ein frühes Stadium divergenten Denkens wider, ohne Konvergenzprozesse einzubeziehen. Dies steht im Einklang mit früheren Studien (z.B. [FMP24]), die zeigen, dass LLMs insbesondere in der Frühphase der Ideenfindung unterstützend wirken, für die konvergente Weiterverarbeitung jedoch zusätzliche Strukturen wie Multi-Agenten-Systeme oder menschliche Kuration erforderlich sind.

Zusammenfassend zeigen unsere Ergebnisse, dass spielerisches Prompting das kreative Denkverhalten von LLMs gezielt fördern kann, ohne die funktionale Kreativität der generierten Ideen zu beeinträchtigen. Dies ist besonders relevant für Innovationskontexte, in denen Ideenvielfalt

und Neuartigkeit in frühen Phasen entscheidend sind, auch wenn für die Umsetzung weitere Verfeinerungen notwendig bleiben. Damit leistet die Studie einen Beitrag zum wachsenden Feld des Prompt Engineerings für Kreativität [LCP+24], [LXG+24], indem sie belegt, dass promptbasiertes Framing – insbesondere die Simulation eines spielerischen Zustands – das generative Verhalten von LLMs systematisch beeinflussen kann. Die Befunde stützen zudem theoretische Modelle, die davon ausgehen, dass LLMs bei entsprechender Anleitung menschenähnliche Kreativität simulieren können [BBP23], [MGN+24].

Einige Limitationen dieser Studie sollten berücksichtigt werden. Erstens wurde keine menschliche Ideengenerierung als Vergleichsbasis einbezogen. Dadurch lässt sich keine Einschätzung abgeben, wie sich LLM-generierte Ideen unter spielerischen Bedingungen im Vergleich zu menschlichem kreativem Output verhalten. Zweitens konzentrierte sich das Experiment auf eine einzige Aufgabenstellung aus dem Bereich der agilen Arbeitsweise in Designagenturen, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Themen oder Problemtypen einschränkt. Drittens erfolgte die Hauptbewertung der generierten Ideen durch GPT-o3, auch wenn eine Teilstichprobe durch einen menschlichen Experten validiert wurde. Die Nutzung desselben Modelltyps für Generierung und Bewertung birgt die Gefahr subtiler Verzerrungen oder überhöhter Bewertungsübereinstimmungen. Viertens unterliegen die verwendeten OpenAI-Modelle einer kontinuierlichen Weiterentwicklung, was die langfristige Gültigkeit der Ergebnisse in Frage stellen könnte. Diese Limitation ist jedoch gleichzeitig als methodische Stärke zu verstehen: Da sich zukünftige Modelle voraussichtlich hauptsächlich verbessern werden, stellen unsere Ergebnisse eine konservative Untergrenze der zu erwartenden Effekte dar. Allerdings bleibt unklar, ob sich die hier identifizierten Wirkungsmechanismen der Verspieltheit in zukünftigen Modellversionen in vergleichbarer Weise manifestieren. Fünftens beschränkt sich diese Studie auf ein einzelnes LLM (GPT-o3) und berücksichtigt keine Modelle anderer Anbieter wie Claude, Gemini oder LLaMA. Während GPT-Modelle in der bisherigen Forschung zu generativer KI und Ideenfindung eine etablierte Vergleichsbasis bieten, bleibt unklar, ob die identifizierten Effekte der Verspieltheit modellspezifisch sind oder sich auf andere LLM-Architekturen übertragen lassen.

Um diese Limitationen zu überwinden und auf den vorliegenden Ergebnissen aufzubauen, könnte zukünftige Forschung mehrere Richtungen verfolgen: Erstens sollte ein breiteres Spektrum an Ideenfindungsaufgaben einbezogen und menschliche Vergleichsdaten erhoben werden, um die externe Validität zu stärken. Zweitens könnten alternative reale Aufgaben oder standariserte Kreativitätstests wie die Alternative Uses Task (AUT) eingesetzt werden, um die Generalisierbarkeit der Effekte spielerischer Prompts zu prüfen. Drittens ließe sich untersuchen, wie iterative Aufforderungen gestaltet werden können, um Verspieltheit über den gesamten Generierungsprozess aufrechtzuerhalten. Viertens könnte die Kombination spielerischer Interventionen mit Techniken wie Chain-of-Thought-Prompting neue Synergieeffekte offenlegen. Fünftens bietet sich ein Vergleich mit anderen kreativitätsfördernden Strategien wie Analogien, Einschränkungen oder Gamification an. Sechstens sollte die Forschung Ideengenerierung und -auswahl gemeinsam betrachten, um die Leistung über den gesamten Lösungsraum der Double-Diamond-Logik zu bewerten. Schließlich erfordern die kontinuierliche Modellentwicklung und die Vielfalt der LLM-Anbieter systematische Replikationen dieser Studie mit neueren Modellversionen und verschiedenen LLM-Architekturen.

Für die praktische Implementierung ergeben sich aus unseren Ergebnissen konkrete Handlungsempfehlungen: Organisationen sollten spielerische Prompting-Techniken gezielt in der divergenten Phase von Innovationsprozessen einsetzen, wenn eine breite Ideenexploration gewünscht ist. Der zweistufige Ansatz unserer Studie – erst spielerische Aktivierung durch strukturiertes Spiel und Improvisation, dann fokussierte Aufgabenstellung – kann als Vorlage für die Entwicklung eigener Prompt-Strategien dienen. Konkret empfiehlt sich folgendes Vorgehen: (1) Aufgabenumrahmung als Spiel mit definierten Regeln und Belohnungssystemen, (2) kurze Improvisationssequenz zur kognitiven Lockerung, (3) bewusste Rückkehr zum fokussierten Arbeitskontext, (4) strukturierte Ideengenerierung. Da die funktionale Qualität nicht beeinträchtigt wird, können solche Techniken bedenkenlos in frühen Innovationsphasen eingesetzt werden, sollten jedoch durch etablierte Bewertungs- und Auswahlverfahren ergänzt werden.

Literatur

[Ama83] AMABILE, T. M.: Brilliant but cruel: Perceptions of negative evaluators. *Journal of Experimental Social Psychology*, (19)2, 1983, S. 146–156

[Ama97] AMABILE, T. M.: Motivating Creativity in Organizations: On Doing What You Love and Loving What You Do. *California Management Review*, (40)1, 1997, S. 39–58

[Ban13] BANATHY, B. H.: *Designing Social Systems in a Changing World*. Springer Science & Business Media, 2013

[BBP23] BOUSCHERY, S. G.; BLAZEVIC, V.; PILLER, F. T.: Augmenting human innovation teams with artificial intelligence: Exploring transformer-based language models. *Journal of Product Innovation Management*, (40)2, 2023, S. 139–153

[BM13] BATESON, P. P. G.; MARTIN, P.: *Play, Playfulness, Creativity and Innovation*. Cambridge University Press, 2013

[BPT+24] BELL, J. J.; PESCHER, C.; TELLIS, G. J.; FÜLLER, J.: Can AI Help in Ideation? A Theory-Based Model for Idea Screening in Crowdsourcing Contests. *Marketing Science*, (43)1, 2024, S. 54–72

[CC05] CROPLEY, D. H.; CROPLEY, A. J.: Engineering creativity: A systems concept of functional creativity. In: Kaufman, J. C.; Baer, J. (Hrsg.): *Creativity across domains – Faces of the muse*. Psychology Press, Mahwah, New Jersey, 2005

[CKC11] CROPLEY, D. H.; KAUFMAN, J. C.; CROPLEY, A. J.: Measuring Creativity for Innovation Management. *Journal of technology management & innovation*, (6)3, 2011, S. 13–30

[Dan99] DANSKY, J. L.: Play. In: Runco, M. A.; Pritzker, S. R. (Hrsg.): *Encyclopedia of creativity*. 2. Auflage, Band 2, Academic Press, San Diego, CA, 1999, S. 393–408

[FMP24] FISCHER-BRANDIES, L.; MEIERHÖFER, S.; PROTSCHEKY, D.: Augmenting divergent and convergent thinking in the ideation process: An LLM-based Agent System. *ECIS 2024 Proceedings*, (13), 2024

[Fre26] FREUD, S.: Creative writers and daydreaming. In: Vernon, P. E. (Hrsg.): *Creativity*. Penguin, New York, 1926, S. 126–136

[Gui68] GUILFORD, J. P.: *Intelligence, creativity, and their educational implications*. Knapp, San Diego, 1968

[GW23] GÓMEZ-RODRÍGUEZ, C.; WILLIAMS, P.: A Confederacy of Models: a Comprehensive Evaluation of LLMs on Creative Writing, 2023

[GW92] GLYNN, M. A.; WEBSTER, J.: The Adult Playfulness Scale: An Initial Assessment. *Psychological Reports*, (71)1, 1992, S. 83–103

[HB24] HÖRAUF, D.; BREM, A.: Organisational Creativity And Artificial Intelligence: Introduction Of A Creativity Assessment For Ideation. *International Journal of Innovation Management*, 2024

[HFW+24] HU, X.; FU, H.; WANG, J.; WANG, Y.; LI, Z.; XU, R.; LU, Y.; JIN, Y.; PAN, L.; LAN, Z.: NOVA: An Iterative Planning and Search Approach to Enhance Novelty and Diversity of LLM Generated Ideas, 2024

[HH23] HAASE, J.; HANEL, P. H.: Artificial muses: Generative artificial intelligence chatbots have risen to human-level creativity. *Journal of Creativity*, (33)3, 2023

[KS25] KRANZLE, T.; SHARRATT, K.: Evaluating Creative Output With Generative Artificial Intelligence: Comparing GPT Models and Human Experts in Idea Evaluation. *Creativity and Innovation Management*, 2025

[LCP+24] LU, L.-C.; CHEN, S.-J.; PAI, T.-M.; YU, C.-H.; LEE, H.; SUN, S.-H.: LLM Discussion: Enhancing the Creativity of Large Language Models via Discussion Framework and Role-Play, 2024

[LP24] LIM, G.; PERRAULT, S. T.: Rapid AIdeation: Generating Ideas With the Self and in Collaboration With Large Language Models, 2024

[LXG+24] LI, L.; XU, W.; GUO, J.; ZHAO, R.; LI, X.; YUAN, Y.; ZHANG, B.; JIANG, Y.; XIN, Y.; DANG, R.; ZHAO, D.; RONG, Y.; FENG, T.; BING, L.: Chain of Ideas: Revolutionizing Research Via Novel Idea Development with LLM Agents, 2024

[MBL24] MERCIER, M.; BOURGEOIS-BOUGRINE, S.; LUBART, T.: Board Games and Creativity: Playfulness as a Mediator. *Simulation & Gaming*, (56)1, 2024, S. 63–83

[MGN+24] MEINCKE, L.; GIROTRA, K.; NAVÉ, G.; TERWIESCH, C.; ULRICH, K. T.: Using large language models for idea generation in innovation. *SSRN*, 2024, S. 1–13

[MR06] MAINEMELIS, C.; RONSON, S.: Ideas are Born in Fields of Play: Towards a Theory of Play and Creativity in Organizational Settings. *Research in Organizational Behavior*, (27), 2006, S. 81–131

[Pay20] PAYTON, J.: Using Mindful Play to Unlock Creativity: A Creative Companion. *Prism: Casting New Light on Learning, Theory & Practice*, (3)1, 2020, S. 8–33

[RG19] REIMERS, N.; GUREVYCH, I.: Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks, 2019

[RG90] RUSS, S. W.; GROSSMAN-MCKEE, A.: Affective expression in children's fantasy play, primary process thinking on the Rorschach, and divergent thinking. *Journal of Personality Assessment*, (54)3-4, 1990, S. 756–771

[RJ12] RUNCO, M. A.; JAEGER, G. J.: The Standard Definition of Creativity. *Creativity Research Journal*, (24)1, 2012, S. 92–96

[Run10] RUNCO, M. A.: Divergent thinking, creativity, and ideation. In: Kaufman, J. C.; Sternberg, R. J. (Hrsg.): *The Cambridge Handbook of Creativity*. Cambridge University Press, New York, 2010, 413–447

[Run99] RUNCO, M. A.: A Longitudinal Study of Exceptional Giftedness and Creativity. *Creativity Research Journal*, (12)2, 1999, S. 161–164

[Rus13] RUSS, S. W.: *Affect and Creativity: the Role of Affect and Play in the Creative Process*. Routledge, 2013

[SC12] SUNG, S. Y.; CHOI, J. N.: Effects of team knowledge management on the creativity and financial performance of organizational teams. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, (118)1, 2012, S. 4–13

[SGK+25] SHARRATT, K.; GAROFALO, O.; KRANZLE, T.; VAN DER VEEN, C.: Playing With Ideas: A Field Experiment in Entrepreneurial Problem Solving, 2025

[Sha03] SHANE, S.: *A General Theory of Entrepreneurship – The Individual-Opportunity Nexus*. Edward Elgar Publishing, 2003

[SMG+22] SIEMENS, G.; MARMOLEJO-RAMOS, F.; GABRIEL, F.; MEDEIROS, K.; MARRONE, R.; JOKSIMOVIC, S.; LAAT, M. DE: Human and artificial cognition. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, (3), 2022, S. 100107

[SO99] STERNBERG, R. J.; O'HARA, L. A.: Creativity and intelligence. In: Sternberg, R. J. (Hrsg.): *Handbook of Creativity*. Cambridge University Press, New York, 1999, S. 251–272

[SSB+22] STEVENSON, C.; SMAL, I.; BAAS, M.; GRASMAN, R.; VAN DER MAAS, H.: Putting GPT-3's Creativity to the (Alternative Uses) Test, 2022

[TC10] TVERSKY, B.; CHOU, J. Y.: Creativity: Depth and Breadth. *Design creativity* 2010

[Tor69] TORRANCE, E. P.: *Creativity*. Dimensions Publishing Company, 1969

[Tor95] TORRANCE, E. P.: The nature of creativity as manifest in its testing. In: Sternberg, R. J. (Hrsg.): *The nature of creativity*. Cambridge University Press, New York, 1995, S. 43–75

[Wes16] WEST, S.: *Playing at Work: Organizational Play as a Facilitator of Creativity*. Department of Psychology, Lund University, Lund, 2016

[WHC17] WEST, S.; HOFF, E.; CARLSSON, I.: Enhancing team creativity with playful improvisation theater: a controlled intervention field study. *International Journal of Play*, (6)3, 2017, S. 283–293

[WSF99] WARD, T. B.; SMITH, S. M.; FINKE, R. A.: Creative cognition. In: Sternberg, R. J. (Hrsg.): *Handbook of Creativity*. Cambridge University Press, New York, 1999, S. 189–212

Autorin

Theresa S. Kranzle, M. Sc., ist externe Doktorandin am Institut für Projektmanagement und Innovation (IPMI) der Universität Bremen. Zuvor absolvierte sie ein Studium der Business Administration und Data Science an der Copenhagen Business School. Während dieser Zeit war sie als Forschungsassistentin und Co-Autorin am Institut für Strategie und Innovation tätig. Ihre Forschungsinteressen liegen an der Schnittstelle von Ideation und generativer künstlicher Intelligenz; insbesondere in der Frage, wie Large Language Models kreative Prozesse unterstützen und gestalten können.

<https://www.linkedin.com/in/theresakranzle/>

Vorausschauende Risiko- und Resilienzbewertung von Lieferketten

***Sarah Maria Lang¹, Christoph Zanker², Simon Glöser-Chahoud¹,
Marcus Wiens¹***

¹ *TU Bergakademie Freiberg/HfWU, sarahmaria.lang@hfwu.de,
simon.gloeser-chahoud@bwl.tu-freiberg.de, marcus.wiens@bwl.tu-freiberg.de*
² *HfWU, christoph.zanker@hfwu.de*

Zusammenfassung

Im Beitrag wird eine strukturierte Bewertungsmatrix zur vorausschauenden, risikoorientierten Einschätzung globaler Lieferketten vorgestellt. Ziel ist es, potenzielle Störfaktoren systematisch zu erfassen, zu priorisieren und in ihrer unternehmensspezifischen Relevanz zu bewerten. Ausgehend von einem netzwerktheoretischen Verständnis wird die Lieferkette in ihre zentralen Elemente; Knoten (z. B. Lieferanten) und Verbindungen (z. B. Transportwege), unterteilt. Darauf aufbauend werden in einem möglichst umfassenden Rahmen Risikofaktoren gesammelt, die sich entlang dieser Strukturen negativ auf Unternehmen auswirken können. Die Grundlage bildet eine strukturierte Literaturanalyse mit 29 Fachquellen, aus der ein konsolidierter Risikofaktorenkatalog entwickelt wurde. Dieser wurde im Rahmen zweier Expertenworkshops mit Industrievertretern validiert und zur Ableitung einer adaptiven Vier-Felder-Matrix genutzt. Die Matrix erlaubt die Einordnung von Risiken entlang ihrer erwarteten Auswirkungen und individuellen Priorisierung und kann so als Orientierungsrahmen für ein vorausschauendes Risikomanagement dienen. Sie unterstützt Unternehmen dabei, differenzierte Risikoprofile zu erfassen, regulatorische Anforderungen (z. B. gemäß LkSG) zu erfüllen und gezielt Maßnahmen abzuleiten. Die vorgestellte Methodik stellt einen Zwischenschritt dar, die vollständige Maßnahmenzuordnung erfolgt im weiteren Projektverlauf.

Schlüsselworte

Lieferantenrisiko, vorausschauende Risikobewertung, Lieferkettenresilienz, Vier-Felder-Matrix, Mixed-Method-Ansatz

Foresighted Risk and Resilience Assessment of Supply Chains

Abstract

This study presents a methodologically grounded framework for the foresighted risk-oriented assessment of global supply chains (SCs). The aim was to systematically identify and prioritise potential disruption factors and evaluate them in terms of their firm-specific relevance. Building on a network-theoretical perspective, supply chains are decomposed into key structural elements such as nodes (e.g. suppliers) and edges (e.g. transport links). A broad set of risk factors affecting these components were compiled to assess their disruptive potential. A consolidated catalogue of the risk factors was developed based on a structured review of 29 scientific publications. This catalogue was validated through two expert workshops with industry participants, and served as the foundation for an adaptive four-quadrant matrix. The matrix enables differentiated classification of risks based on expected impact and subjective prioritisation, and serves as a practical tool for proactive risk management. It supports companies in capturing individualised risk profiles, fulfilling regulatory requirements (e.g. LkSG), and deriving appropriate response strategies. The approach represents an intermediate step; the systematic assignment of specific mitigation actions will be followed in subsequent research.

Keywords

Supplier risk assessment, foresighted risk assessment, supply chain resilience (SCRE), four-field matrix, Mixed-Method

1 Bedarf für eine vorausschauende und resilienzorientierte Bewertung von Lieferketten

Globale Lieferketten konkurrieren zunehmend über ihre Widerstandsfähigkeit. Die internationale Fragmentierung industrieller Wertschöpfung hat komplexe, auf Effizienz getrimmte Netzwerke hervorgebracht, die jedoch häufig nicht mehr den aktuellen Herausforderungen gewachsen sind. Lokale Störungen, etwa durch geopolitische Spannungen, Cyberangriffe oder klimabedingte Ereignisse, können sich schnell auf das gesamte Netzwerk ausweiten [Iva20], [Wie21]. Die stark ausgeprägte Effizienzorientierung vergangener Jahre, gekennzeichnet durch Lean-Prinzipien, Just-in-Time-Logistik und Single-Sourcing, hat zwar kurzfristige Kostenvorteile ermöglicht, gleichzeitig aber strukturelle Verwundbarkeiten und Abhängigkeiten verstärkt [CP04], [Tan06].

In diesem Kontext rückt die Resilienz von Lieferketten zunehmend in den Fokus betriebswirtschaftlicher und technikbasierter Planungsansätze. Resilienz beschreibt die Fähigkeit eines Systems, externe Störungen nicht nur zu überstehen, sondern sich flexibel und lernfähig an neue Umweltbedingungen anzupassen [PH09], [SR05].

Dabei wird nicht der Gegensatz zur Effizienz verstanden, sondern vielmehr die Fähigkeit zur möglichst frühzeitigen Bewältigung von Störungen. Dennoch besteht ein klassischer Zielkonflikt: Maßnahmen zur Resilienzerhöhung, wie z. B. Redundanz, geografische Diversifikation oder Sicherheitsbestände, stehen oft im Widerspruch zu betriebswirtschaftlichen Effizienzzügen, ein Spannungsfeld, das in strategischen Liefernetzentscheidungen berücksichtigt werden muss [BSA+14]. Zugleich erhöhen gesetzliche Anforderungen, wie das deutsche Lieferketten-sorgfaltspflichtengesetz (LkSG) [AH22] und internationale Standards (z. B. ISO 31000) [Iso18] den Handlungsdruck, Risiken nicht nur zu identifizieren, sondern strukturiert zu bewerten und nachweislich zu dokumentieren. Der Aufbau einer nachvollziehbaren, flexibel anwendbaren Bewertungsmatrix wird somit auch aus regulatorischer Sicht zunehmend zur strategischen Notwendigkeit.

Bekannte Resilienzmaßnahmen bleiben oft ungenutzt, da sie mit hohen Kosten verbunden sind, wenn sie pauschal angewandt werden. Ein zentrales Hindernis für gezielte Resilienzstrategien ist das fehlende systematische und vorausschauende Risikobewusstsein in der Sourcing-Gestaltung. Gleichzeitig fehlt es an qualitativ fundierten und praktikablen Bewertungsinstrumenten, die eine individuelle Risikoeinschätzung entlang der spezifischen Supply-Chain-Struktur eines Unternehmens ermöglichen. Bestehende Modelle operieren häufig mit generischen Indikatoren oder basieren auf retrospektiven Risikoerfahrungen, ohne die situative Verwundbarkeit einzelner Akteure oder Subnetzwerke proaktiv zu bewerten [HZY+15].

Die Herausforderung besteht darin, Risikofaktoren nicht nur quantitativ (z. B. über Eintrittswahrscheinlichkeiten oder Schadensausmaß) zu erfassen, sondern auch qualitativ und kontextsensitiv, im Sinne einer vorausschauenden Planung einzubinden. Aktuelle Resilienzansätze betrachten meist die gesamte Kette und fokussieren sich auf logistische Verbindungen, während die Analyse einzelner Akteure vernachlässigt wird.

Um die identifizierte Forschungslücke, die feingliedrige, praxisnahe Strukturierung von Risikofaktoren zur Erfassung von Risiken seitens einzelner Akteure der Lieferkette, zu schließen, wurde ein mehrstufiges Vorgehen verfolgt: (1) systematische Literaturanalyse, für den Gesamtüberblick (2) verdichtende Kategorienbildung auf Grundlage der Literatur und (3) Validierung in Expertenworkshops, zur Verbesserung der Anwendbarkeit. Zwei moderierte Expertenworkshops mit Industrievertreter:innen aus Einkauf, Supply Chain Management (SCM) und Produktion (jeweils aus deutschen mittelständischen und großen Unternehmen) dienten der Plausibilisierung und Priorisierung der in der Literatur extrahierten Faktoren.

Die Beiträge aus den Workshops wurden protokolliert und anschließend inhaltsanalytisch ausgewertet. Auf dieser Basis wurde eine übertragbare Bewertungsmatrix abgeleitet, die es Unternehmen erlaubt, kontextspezifische Risikoprofile systematisch zu erfassen und für Folgeentscheidungen aufzubereiten. Um dies zu erreichen, wurden zwei Forschungsfragen formuliert. Mit der Beantwortung der Frage 1 (F1) wurden inhaltliche Strukturen gesetzt. Dies dient als Grundlage für Frage 2 (F2), welche sich mit der Gestaltung und praktischen Umsetzbarkeit der Bewertungsmatrix beschäftigt.

F 1 (Inhalt): Welche Risikofaktoren wirken aus der Vorleistungskette auf das eigene Unternehmen, und wie lassen sie sich in konsistente Kategorien überführen?

F 2 (Gestaltung): Wie muss eine strukturierte Bewertungsmatrix gestaltet sein, damit Unternehmen ihn flexibel auf ihre kontextspezifischen Risikoprofile anwenden können, als Grundlage, um in einem Folgeschritt passende Maßnahmen abzuleiten?

Ziel dieses Beitrags ist es, eine wissenschaftlich fundierte und zugleich praxisorientierte Bewertungsmatrix zur vorausschauenden Risikoidentifikation in Liefernetzwerken zu entwickeln. Der Fokus liegt auf einer flexiblen Anwendbarkeit, Unternehmensspezifik und die Modularität der Bewertung. Die vorgestellte Methodik versteht sich als Zwischenschritt: Sie bietet einen strukturierten Überblick über zentrale Risikofaktoren und schafft die Grundlage für eine spätere systematische Zuordnung geeigneter Handlungsoptionen, deren vollständige Ausarbeitung Gegenstand nachfolgender Untersuchungen ist.

Der Beitrag basiert auf einem laufenden Forschungsprojekt und stellt einen Zwischenstand dar. Bereits in dieser Phase soll die systematische Erfassung und Strukturierung von Risikofaktoren eine praxisnahe Orientierungshilfe liefern, die Unternehmen bei der Entwicklung eines präventiven Risikobewusstseins unterstützt und als Grundlage für nachgelagerte Maßnahmen dient.

2 Methodisches Vorgehen

Die gezielte Identifikation und strukturierte Bewertung potenzieller Risikofaktoren entlang globaler Lieferketten ist eine zentrale Voraussetzung für den Aufbau resilenter Wertschöpfungsnetzwerke. Ein wirksames Risikomanagement muss dabei vorausschauend angelegt sein: Nur wenn Störpotenziale frühzeitig erkannt und systematisch eingeordnet werden, können Unternehmen geeignete Handlungsoptionen rechtzeitig ableiten. Diese Vorbereitung kann auch im Falle unerwarteter Störungen dienen, da schneller auf Handlungsoptionen von ähnlichen Störevents zurückgegriffen werden kann. Die vorliegende Arbeit greift diesen Bedarf auf und entwickelt auf Basis eines mehrstufigen Vorgehens, bestehend aus Literaturauswertung, Expertenvalidierung und konzeptioneller Weiterentwicklung, eine adaptiv einsetzbare Bewertungsmatrix zur Unterstützung unternehmensspezifischer Risikoeinschätzung.

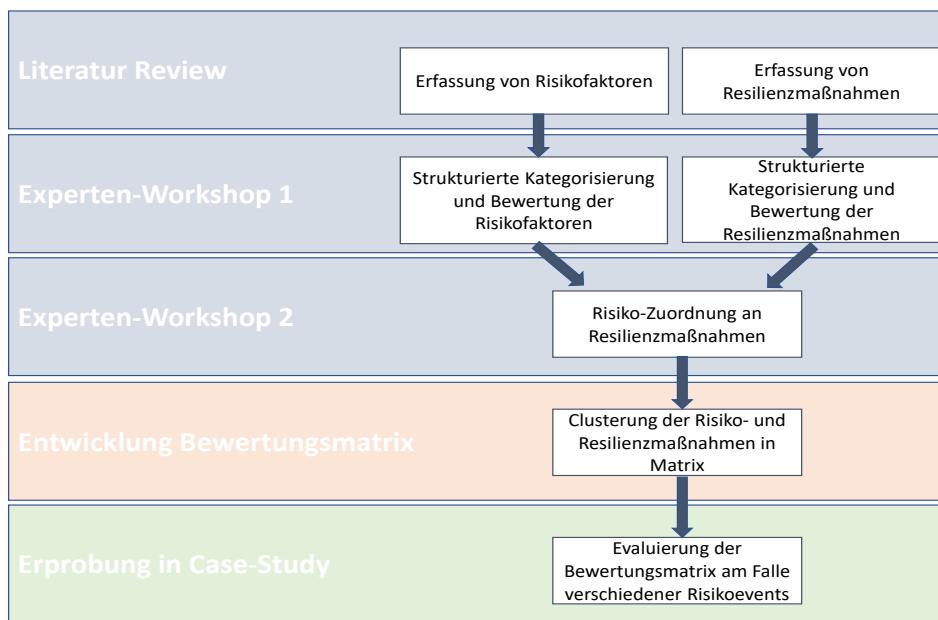


Bild 1: Aufbau der Methodik zur Herleitung der Bewertungsmatrix

2.1 Literaturbasierte Fundierung und Anschlussfähigkeit an Regulatorik

Ziel der Literaturauswertung ist es, eine belastbare, wissenschaftlich fundierte Grundlage für die Ableitung von Risikofaktoren zu schaffen, die potenziell zur Störung von Liefernetzwerken führen können. Die Erhebung orientiert sich am PRISMA-Modell [RP20] (sowie an etablierten Standards qualitativer Inhaltsanalysen [CC18]). Es wurden die Datenbanken Web of Science und Scopus (Januar 2010–Dezember 2024) nach Titel/Abstract/Keywords mit kombinierten Begriffen zu Supply Chain \times (risk/disruption/resilience/robustness) \times (assessment/measurement/framework/network) sowie Stichwörtern wie ripple effect und risk propagation durchsucht. Eingeschlossen wurden deutsch- und englischsprachige, peer-reviewte Zeitschriftenartikel mit explizitem Risiko- oder Resilienzbezug auf Organisations- bzw. Netzwerkebene und erkennbarer Anschlussfähigkeit an Risikobewertung (Operationalisierung, Faktorenkataloge oder Bewertungsmatrix). In der zweiten Stufe (Titel/Abstract, anschließend Volltext) wurden Risikofaktoren und deren Kategorisierung extrahiert. Insgesamt erfüllten 29 Artikel die Qualitätskriterien und gingen in die Synthese ein. Der gewählte Zeitraum stellt sicher, dass sowohl

prä- als auch post-COVID-Arbeiten berücksichtigt werden und gewährleistet dadurch Aktualität und externe Validität; der Endpunkt 2024 ermöglicht die Einbeziehung der jüngsten Entwicklungen.

Tabelle 1: Übersicht der aus der Literatur gesammelten Risikofaktoren

QUELLE	RISIKOFAKTOREN
[UZM+22]	Qualität, Technologie, Service, Lieferfähigkeit, Finanzen
[SRM+24]	Umweltleistung, Qualität, Preis, Liefertreue, Technologie
[PF24]	Kosten, Beschaffungsrisiko, Liefertreue
[LWW+24]	Nachfrageänderung, Transportstörung, Marktvolatilität
[ATA19]	Preis, Qualität, CSR, Finanzlage, Lieferrisiko
[JWP+20], [Jüt05]	Soziale, ökologische und ökonomische Nachhaltigkeitsrisiken
[Urb19]	Managementsysteme, Umwelt, Prozess
[WG21]	Qualität, Lieferung, Kooperation, Wirtschaft, Umfeld, Compliance
[ÖK22]	Betrieb, Umwelt, Management, Sicherheit, Soziales
[WZB23]	Ökonomie, Ökologie, Soziales
[GZ14]	Frühwarnindikatoren, SAP-Datenanalyse
[Gan14]	Lieferantenleistung, KPIs
[CZ18]	Lieferservice, Kreditrisiko, Qualität
[HLW+20]	Qualität, Preis, Lieferung, Service, Technologie
[TCW23]	Umweltindikatoren, NLP-basierte Bewertung
[CTC24]	Ökobilanz, Nachhaltigkeitskriterien
[KF18]	Klassifizierung nach Risiko, qualitative/quantitative Kriterien
[LWZ+21]	Finanzen, Produktion, Qualität, Lieferung, Kooperation, Service
[KST19]	Lieferantenleistung, Risikotreiber
[VS13]	Lieferkette, Ressourcen, Institutionen, Infrastruktur
[TR18]	Kosten, Nachhaltigkeit, Politik, Umwelt, Vertrauen, Logistik
[Loc19]	Netzwerk, Operationen, Externe Ereignisse
[DCR09]	Geografische Distanz, Umweltindex
[Loc14]	Länderrisiken, Handel, Korruption

[WSA+23]	Produktionskapazität, Versand, Finanzen
[SMV+23]	Nachhaltigkeit, Lieferantenperformance
[MBM+19]	Finanzen, Produktion, Qualität, Kosten, Lieferverzug
[HKD+22]	Kosten, Abhängigkeit, Organisation, Prozesse
[RH20]	Eintrittswahrscheinlichkeit, Auswirkungen

Die dargestellten Quellen in Tabelle 1 wurden systematisch ausgewertet, um zentrale Risikofaktoren in globalen Lieferketten zu identifizieren. Dabei wurden jene Faktoren extrahiert, die entweder aufgrund ihrer Häufigkeit in der Literatur oder durch eine möglichst ganzheitliche Betrachtung der Lieferkette besonders relevant erscheinen. Die Ergebnisse wurden anschließend in einen strukturierten Risikofaktorenkatalog (Tabelle 2) überführt und für mehr Übersichtlichkeit Vulnerabilitäts-Kategorien zugeteilt.

Berücksichtigt wurden dabei zentrale Arbeiten, die den Diskurs zu Lieferkettenrisiken wesentlich geprägt haben. Wagner und Bode (2008) [WB08] identifizieren auf Basis umfangreicher Erhebungen typische Störquellen sowie deren betriebswirtschaftliche Auswirkungen, durch Lieferverzögerungen, Kostensteigerungen oder Reputationsschäden. Tummala und Schoenherr (2011) [TS11] entwickeln ein konzeptionelles Managementmodell, das aufzeigt, dass Risiken entlang der gesamten Lieferkette auftreten können, insbesondere bei grenzüberschreitender Beschaffung. Beide Arbeiten liefern wertvolle Ansätze, bleiben jedoch auf einer klassifizierenden bzw. konzeptionellen Ebene stehen, eine operationalisierbare, praxisnahe Ableitung konkreter Risikofaktoren fehlt weitgehend.

Ein bedeutender Impuls stammt von Zsidisin [Zsi03], der in seiner qualitativen Analyse die subjektive Risikowahrnehmung als entscheidenden Einflussfaktor im Beschaffungsmanagement identifiziert. Seine Arbeit unterstreicht, dass Risikoeinschätzungen nicht allein datenbasiert, sondern stark erfahrungs- und kontextgetrieben erfolgen, ein Befund, der sich auch in unserer Herangehensweise wiederfindet. Neuere Beiträge wie Ivanov [Iva20] oder Kinra et al. [KID+20] betonen zudem die Dynamik und Netzwerkabhängigkeit von Risiken: Störungen breiten sich häufig wellenförmig entlang der Netzwerknoten und -verbindungen aus, weshalb deren Bewertung nicht isoliert, sondern in übergreifende Systemzusammenhänge eingebettet erfolgen muss.

Weitere Studien, wie Wu et al. [WZB23] fordern adaptive Risikorahmenwerke, die sich an volatile Bedrohungslagen anpassen und gleichzeitig unternehmensindividuelle Kontextinformationen berücksichtigen können. Während klassische Arbeiten wie Chopra und Sodhi [CS04] oder Urbaniak et al. [UZM+22] wertvolle Teilespekte liefern, etwa zur Kategorisierung von Risiken oder zur Relevanz von Lieferantentreue, verbleiben sie häufig bereichsspezifisch und bieten keine übergreifende, mikroorientierte Strukturierung. Auch strategisch angelegte Beiträge wie der von Wiedenmann und Größler [WG21] oder Han & Um, [HU24] erfassen zwar aggregierte Systemrisiken, lassen aber die konkrete Anschlussfähigkeit an operative Unternehmenspraxis vermissen.

Ein zentrales Ergebnis der Analyse ist daher, dass bestehende Studien zwar die Vielfalt potenzieller Risiken eindrucksvoll belegen, jedoch keine integrierte Lösung für die kontextspezifische Priorisierung und strukturierte Bewertung auf Akteursebene anbieten. Störungen in Lieferketten entfalten ihre Wirkung selten isoliert. Sie entstehen typischerweise an bestimmten Knotenpunkten (z. B. Lieferanten) oder Verbindungen (z. B. Transportwegen) und können sich, infolge geopolitischer Ereignisse, Naturkatastrophen oder regulatorischer Umbrüche, kaskadierend entlang des Netzwerks ausbreiten [Iva23]. Um solchen Entwicklungen wirksam begegnen zu können, ist ein vorausschauender, unternehmensindividueller Risikoblick erforderlich. Dieser muss sich nicht allein an messbaren Indikatoren orientieren, sondern subjektive Erfahrungen und Kontextwissen berücksichtigen.

Die hier entwickelte Methodik schließt diese Lücke, indem sie netzwerktheoretische Überlegungen [Eul36] subjektive Risikoeinschätzung und regulatorische Anforderungen systematisch in einem flexiblen Risikorahmen zusammenführt [AH22]. Der entwickelte Risikofaktorenkatalog (siehe Tabelle 2) fasst die identifizierten Störfaktoren thematisch zusammen und bildet die Grundlage für die weitere konzeptionelle und empirische Ausgestaltung des Bewertungsrahmens. Diese strukturierte Herangehensweise trägt nicht nur zur wissenschaftlichen Fundierung bei, sondern unterstützt Unternehmen gleichzeitig dabei, ihrer Pflicht zur Risikoanalyse gemäß §§ 4-5 LkSG nachzukommen. Der Katalog liefert damit eine operationale Grundlage für die Einhaltung regulatorisch geforderter Risikoerkennungs- und Bewertungsverfahren [AH22].

Tabelle 2: Katalog der Risikofaktoren entlang der Lieferkette

FAKTOREN FÜR VULNERABILITÄT	RISIKOFAKTOREN
Turbulenzen	<ul style="list-style-type: none"> - Naturkatastrophen - Geopolitische Disruptionen - Unvorhersehbarer Bedarf - Schwankungen der Wechselkurse - Technologieversagen - Pandemien
Vorsätzliche Bedrohung	<ul style="list-style-type: none"> - Diebstahl - Terrorismus/ Sabotage - Arbeitskonflikte/ Arbeiterstreiks - Spionage (Cyber Security Angriffe) - Besondere Interessensgruppen /Lobbyismus - Produkthaftung
Externer Druck	<ul style="list-style-type: none"> - Wettbewerbsfähige Innovationen - soziale/ kulturelle Veränderungen - Politische/ regulatorische Veränderungen - Preisdruck - Unternehmerische Verantwortung - Umweltveränderungen
Ressourcenbeschränkung	<ul style="list-style-type: none"> - Lieferanten - Produktionskapazitäten - Vertriebskapazitäten - Verfügbarkeit von Roh- und Hilfsstoffen - Personelle Ressourcen

Empfindlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Komplexität - Reinheit der Produkte - Eingeschränkte Materialien - Fragilität - Zuverlässigkeit der Ausstattung - Sicherheitsrisiken - Sichtbarkeit/Transparenz für Stakeholder - Symbolisches Markenprofil - Konzentration der Kapazität
Konnektivität	<ul style="list-style-type: none"> - Umfang des Netzwerkes - Vertrauen in Informationen - Grad des Outsourcings - Import- und Exportkanäle - Abhängigkeiten von speziellen Bezugsquellen
Unterbrechung beim Lieferanten	<ul style="list-style-type: none"> - Zuverlässigkeit der Lieferanten - Unterbrechungen beim Kunden

Auf der Grundlage des vorliegenden Katalogs wurde Teilfrage 1 adressiert und theoretisch beantwortet. Im nächsten Schritt wird die empirischen Validierung, Priorisierung sowie die Weiterentwicklung aufgesetzt.

2.2 Expertenworkshops zur kontextbezogenen Validierung des Risikokatalogs

Auf Basis des entwickelten Risikofaktorenkatalogs wurde ein qualitatives Validierungsformat konzipiert, um dessen praktische Relevanz, Verständlichkeit und Strukturierungslogik zu prüfen. Zwei iterativ aufeinander aufbauende Online-Workshops mit insgesamt 14 erfahrenen Expert:innen aus Einkauf und SCM unterschiedlicher Branchen, bildeten den empirischen Kern des Validierungsprozesses. Es handelt sich dabei um deutsche Unternehmen, jedoch sind alle international tätig, weshalb eine internationale Übertragbarkeit angenommen wird. Ziel ist es, die Anschlussfähigkeit an reale Entscheidungssituationen zu sichern und die Grundlage für eine flexible, mikroorientierte Risikoanalyse zu schaffen.

Die Workshops wurden im Rahmen des Forschungsprojekts Re_KI_lienz durchgeführt. Die qualitative Auswertung erfolgte entlang der strukturierenden Inhaltsanalyse nach Mayring [May15]. Aufbauend auf Einzelbewertungen und moderierten Gruppendiskussionen wurden die Bewertungen konsolidiert, thematisch gebündelt und auf Anwendungstauglichkeit geprüft. Die Durchführung war iterativ angelegt, dass bedeutet die ersten Erkenntnisse wurden reflektiert, verdichtet und zur Schärfung der Bewertungslogik in den zweiten Workshop eingebracht.

Die Ergebnisse der Expertenworkshops zeigen deutlich, dass Risiken subjektiv wahrgenommen, situativ unterschiedlich priorisiert werden und von konkreten Erfahrungswerten sowie betrieblichem Kontext abhängen. So wurden pandemiebedingte Risiken beispielsweise nur noch wenig bis mittelmäßig priorisiert, während geopolitische oder zollpolitische Risiken, durch ihre Aktualität stark im Fokus standen. Die Mehrheit der Befragten gab auf Rückfragen an, dass ihr Unternehmen zwar stark von den Auswirkungen der COVID-19-Pandemie betroffen war, diese

jedoch als abgeschlossen gelte und derzeit andere Risiken im Fokus stünden. Auffällig war auch die unterschiedliche Gewichtung je nach Unternehmensposition: OEMs priorisierten infrastrukturelle Risiken, während Zulieferer der Maschinenbau-Branche sowie der Medizintechnik Preis- und Kapazitätsrisiken im Vordergrund sahen. Die Diskussion zeigte einen Bedarf an einer allgemein anwendbaren Bewertungslogik, die leicht an die individuellen Bedarfe der unterschiedlichen Branchen angepasst werden kann. Diese Beobachtungen unterstreichen die Notwendigkeit einer flexiblen Struktur, die subjektive Einschätzungen systematisch auffängt und dennoch strategisch verwertbar macht. Der entwickelte Risikokatalog wurde von den Teilnehmenden mehrheitlich als geeignet bewertet, eine solche Struktur zu ermöglichen, insbesondere aufgrund der Möglichkeit zur individuellen Priorisierung einzelner Risiken. Jedoch sollte, unabhängig von der Risikopriorisierung, situativ passende Maßnahmen zur Verfügung gestellt werden. Weshalb die Form von einem Katalog in Richtung vier-Felder-Matrix verschoben wurde.

Obwohl in den Workshops noch keine konkreten Maßnahmen erarbeitet wurden, dient das Format der wichtigen Vorstufe eines transparenten, anschlussfähigen Orientierungsrahmens, auf dessen Basis maßnahmenspezifische Handlungsempfehlungen in einem nächsten Schritt systematisch zugeordnet werden können.

2.3 Entwicklung der adaptiven Risiko-Maßnahmen-Matrix

Basierend auf dem validierten Risikokatalog und den Workshop-Erkenntnissen, wurde im dritten Schritt eine strukturierte Vier-Felder-Matrix entwickelt, die Unternehmen eine erste risikobasierte Einordnung potenzieller Störfaktoren erlaubt. Ziel ist es, ein flexibles Instrument zu schaffen, das sowohl zur Sensibilisierung als auch zur strategischen Orientierung im Risikomanagement beiträgt, im Sinne eines kontextsensitiven und vorausschauenden Denkrahmens. Die Matrix folgt einer portfoliobasierten Logik, orientiert sich aber in ihrer Ausgestaltung an den Anforderungen der betrieblichen Praxis. Sie kombiniert zwei Dimensionen:

- X-Achse: Erfahrungsbasierte Priorisierung für Folgewirkungen,
- Y-Achse: Potenzielle Auswirkung und Kritikalität für das Unternehmen im Störfall, als Maß für strategische Relevanz.

Diese Achsenkombination ermöglicht eine adaptive Kategorisierung in vier Quadranten (siehe Bild 2), die als Orientierungsrahmen für den Umgang mit Risiken dient. Die Struktur wurde in den Workshops als intuitiv und handhabbar bewertet, insbesondere da sie subjektives Erfahrungswissen mit objektivierbaren Bewertungskriterien verbindet.

Quadrant I: Kritisch, priorisieren (hohe Auswirkung, hohe Priorisierung): Risiken in diesem Feld gelten als besonders bedrohlich und gleichzeitig als relevant im Bewusstsein der Entscheider. Hier besteht akuter Handlungsbedarf. Diese Risiken sollten nicht nur überwacht, sondern konkrete vorausschauende Gegenmaßnahmen vorbereitet werden.

Quadrant II: Kritisch, aufmerksam machen (hohe Auswirkung, geringe Priorisierung): Hierunter fallen Risiken mit potenziell gravierenden Auswirkungen, denen jedoch, möglicherweise mangels Erfahrungswerten, weniger Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Typisch sind

schwer beeinflussbare Risiken, welche jedoch vorbereitende Vorkehrungen erfordern, etwa in Form von robusten, skalierbaren Basismaßnahmen oder Eskalationsplänen.

Quadrant III: Unkritisch, Operativ beherrschbar (geringe Auswirkung, hohe Priorisierung): Dies betrifft alltägliche, tolerierbare Störungen, wie kleine Verspätungen oder kurzfristige Verfügbarkeitsengpässe, die im Normalbetrieb mitgetragen werden können. Für diese Risiken sind keine besonderen Maßnahmen erforderlich, sie fallen unter die operative Routine und müssen lediglich im Standardprozess adressiert werden.

Quadrant IV: Wahrgenommen, aber unkritisch (geringe Auswirkung, hohe Priorisierung): In diesem Quadranten finden sich Risiken, die von Verantwortlichen zwar als relevant wahrgenommen werden, beispielsweise aufgrund aktueller politischer Debatten oder jüngster Störungserfahrungen, deren tatsächliche Auswirkung im Einzelfall jedoch gering ist. Hier empfiehlt sich wieder eine pragmatische Vorkehrung, wie die Vorbereitung kosteneffiziente Basismaßnahmen, ohne Ressourcen zu blockieren.

Damit liefert der Beitrag eine fundierte Bestandsaufnahme des aktuellen Forschungsstands und zeigt, wie ein vorausschauender Bewertungsrahmen auf Basis theoretischer Fundierung und praktischer Validierung entwickelt werden kann. Der Ansatz wurde bereits im Rahmen eines Fallbeispiels erprobt, stellt jedoch noch keinen abschließend ausformulierten Maßnahmenkatalog dar. Die systematische Ableitung und Zuordnung geeigneter Handlungsoptionen je Risikokategorie ist Gegenstand weiterer Arbeiten.

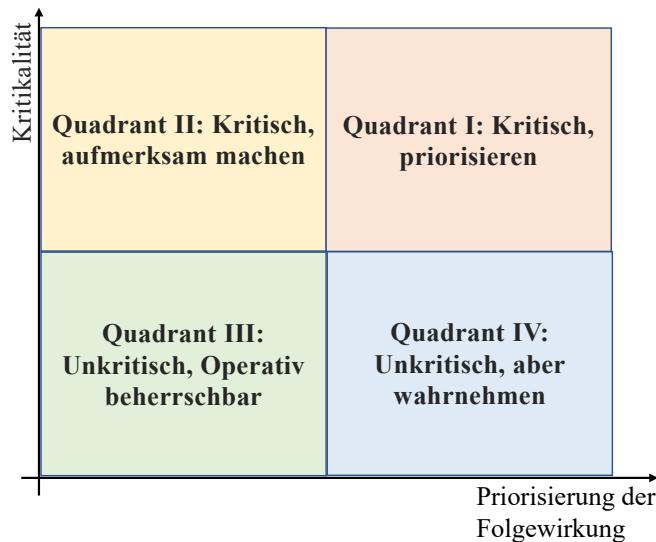


Bild 2: Bewertungsmatrix der Risikofaktoren, in Anlehnung an BCG-Matrix [Rus11].

Damit wird auch die zweite Teilfrage beantwortet, wie ein Bewertungsmatrix so gestaltet sein kann, dass Unternehmen ihn flexibel an ihre spezifische Risikostruktur anpassen können.

3 Diskussion der Ergebnisse anhand eines Fallbeispiels

Um die praktische Anwendbarkeit der entwickelten Risikobewertungsmatrix zu überprüfen, wurde ein qualitatives Fallbeispiel konstruiert, das typische Merkmale eines produzierenden

Mittelstandsunternehmens mit internationaler Zuliefererstruktur abbildet. Ziel war es, die Validität und Anschlussfähigkeit der Bewertungslogik unter realistischen Annahmen zu erproben und zentrale Erkenntnisse aus den Expertenworkshops exemplarisch zu spiegeln.

Die Fallunternehmen sind als Zulieferer tätig und bezieht Vorprodukte aus Asien, Osteuropa und dem Inland. Die Lieferkette ist stark arbeitsteilig organisiert, es bestehen sowohl langjährige Beziehungen zu Tier-1-Lieferanten als auch projektbezogene, volatile Verbindungen in der Tiefe der Lieferkette.

Nach Abschluss und Konsolidierung der Workshopergebnisse wurde teilnehmenden Unternehmen eine adaptierter Risikofaktorenmatrix zur Verfügung gestellt. Die Unternehmen erhielten den Auftrag, ausschließlich jene Risikofaktoren zu nutzen, die aus Sicht des konstruierten Fallunternehmens besonders relevant sind, und diese entlang der Matrixachsen Priorisierung (X) und Auswirkung (Y) zu bewerten.

Die Bewertung erfolgte eigenständig auf Basis verfügbarer Erfahrungswerte, ergänzt um eine kurze Begründung der Einordnung. In Anhang ist ein exemplarischer, anonymisierter Ausschnitt der Einordnung. Es ist zu beobachten, wie unterschiedlich die Einordnung, trotz gleicher Ausgangslage, aber mit unterschiedlichem Hintergrundwissen, ausfällt.

So wurde beispielsweise das Risiko „Regulatorische Disruption“ infolge exportseitiger Auflagen von Unternehmen 1 in Quadrant II (kritisch, aber bislang wenig priorisiert) eingeordnet, da die potenzielle Auswirkung bei Eintreten als erheblich eingeschätzt wurde, bislang jedoch keine akute Betroffenheit im eigenen Unternehmen vorlag. Im Gegensatz dazu wurde das Risiko „Materialverknappung“ vor allem bei elektronischen Zukaufteilen aufgrund wiederholter Störungserfahrungen mit hoher subjektiver Relevanz in Quadrant I (kritisch und priorisiert) verortet, was bei Unternehmen 2 als unkritisch galt, es jedoch aufgrund von Nachrichten wahrgenommen wurde.

Die Anwendung des Rasters wurde von den Beteiligten als hilfreich eingeschätzt, insbesondere da es eine niedrigschwellige, aber systematische Strukturierung von Risiken erlaubt. Die Möglichkeit zur subjektiven Priorisierung wurde von vielen als realistischer Zugang gewertet, da sie das Erfahrungswissen der Fachabteilungen einbezieht. Der vielfach geäußerte Kommentar der Experten war: „Jetzt habe ich die Risiken eingeordnet, weiß dass eine Bedrohung vorliegt, was mache ich konkret damit?“ Diese Rückmeldung unterstreicht die Relevanz des geplanten nächsten Schritts: der systematischen Zuordnung konkreter Handlungsoptionen je Quadranten, an welcher derzeit gearbeitet wird.

Damit bietet der Beitrag bereits im Zwischenstand einen klaren Mehrwert: Unternehmen erhalten eine strukturierte Orientierung über zentrale Risikofaktoren und können auf dieser Grundlage erste, kontextspezifische Risikoprofile ableiten. Zugleich trägt der Ansatz zur vorausschauenden Gestaltung von Liefernetzwerken bei, da er frühzeitig Ansatzpunkte für Prävention und Resilienzbildung sichtbar macht. Wissenschaftlich eröffnet die vorgestellte Systematisierung Anknüpfungspunkte für weiterführende Arbeiten, insbesondere für die Entwicklung und empirische Erprobung eines umfassenden Maßnahmenkatalogs, der im weiteren Projektverlauf ausgearbeitet wird.

4 Fazit und Ausblick

Der Beitrag präsentiert eine Grundlage zur strukturierten Bewertung von Risiken in Lieferketten, basierend auf einer systematischen Literaturanalyse und der empirischen Validierung durch Experten. Die entwickelte Vier-Felder-Matrix ermöglicht eine differenzierte, subjektiv-kontextuelle Einordnung potenzieller Störpotenziale. Zwar wurde der Bewertungsansatz bereits im Rahmen eines Fallbeispiels erprobt, die systematische Ableitung und Zuordnung geeigneter Handlungsoptionen steht jedoch noch aus und bildet den nächsten Schritt im Forschungsprozess.

Das Fallbeispiel zeigt, dass die Matrixlogik geeignet ist, unternehmensspezifisches Risikobewusstsein zu strukturieren und entlang erfahrungsbasierter Einschätzungen in ein strategisch anschlussfähiges Raster zu überführen. Damit wird der Grundstein für ein vorausschauendes Risikomanagement gelegt, welches regulatorische Anforderungen berücksichtigt, interne Entscheidungsprozesse unterstützt und die spätere Maßnahmenerarbeitung gezielt vorbereitet. Weitergedacht wäre es für Unternehmen sinnvoll, bei der künftigen Maßnahmenzuordnung eine Unterscheidung in kurzfristig aktivierbare und langfristig planbare Maßnahmen vorzunehmen. So könnte die Matrix im Ereignisfall nicht nur als strategisches Werkzeug, sondern auch als operatives Nachschlagewerk dienen, um gemäß des Resilienzgedankens, auch bei unerwartet auftretenden Störungen rasch auf bewährte, schnell wirksame Handlungsoptionen zurückgreifen zu können. Dies kann insbesondere bei Störungen helfen, die zwar bekannt waren, aber bislang nicht akut im Fokus standen, um schnellstmöglich zum Ausgangspunkt zurückzukehren.

Der vorliegende Beitrag stellt den Zwischenstand eines laufenden Forschungsvorhabens dar, das auf die Entwicklung eines praxisnahen, adaptiven Bewertungsrahmens für Risiken in Lieferketten abzielt. Mit dem vorgestellten Risikokatalog und der darauf aufbauenden Matrixstruktur wurde ein erster Baustein für ein vorausschauendes Lieferketten-Risikomanagement geschaffen, der sowohl wissenschaftlich fundiert als auch durch Unternehmenspraxis validiert ist. Diese Struktur ermöglicht es Unternehmen künftig, Risiken im Ereignisfall schneller einzuordnen und gezielt auf kurzfristig aktivierbare oder langfristig vorbereitbare Optionen zurückzugreifen.

Perspektivisch soll die Matrix nicht nur zur strategischen Steuerung beitragen, sondern auch als Instrument dienen, um unternehmensindividuelle Risikoanalysen im Sinne aktueller regulatorischer Vorgaben strukturiert zu dokumentieren. Damit entfaltet der Bewertungsrahmen einen doppelten Nutzen: als praxisnahes Entscheidungsinstrument und als Compliance-konformes Dokumentationswerkzeug für ein umfassenderes Risiko- und Resilienzmanagement. Dieser Zwischenstand bietet somit bereits eine fundierte Orientierungshilfe zur vorausschauenden Risikoidentifikation und eröffnet zugleich Anschlussmöglichkeiten für weiterführende Forschung, insbesondere zur systematischen Ableitung und empirischen Validierung von Maßnahmenkatalogen.

Förderhinweis:

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekts „Re_KI_lienz – Resilienz durch agile Wertschöpfungsnetzwerke und KI-gestützte Optimierung“, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird.

Literatur

[ATA19] ALIKHANI, R.; TORABI, S. A.; ALTAY, N.: Strategic supplier selection under sustainability and risk criteria. *International Journal of Production Economics*, Band 208, 2019

[AH22] ALTENSCHMIDT, S.; HELLING, D.: Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten zur Vermeidung von Menschenrechtsverletzungen in Lieferketten (Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz – LkSG). Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin, 2022 , S. 1–21, Zugriffen: 20. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/10.37307/b.978-3-503-21155-5.01>

[BSA+14] BRANDON-JONES, E.; SQUIRE, B.; AUTRY, C. W.; PETERSEN, K. J.: A Contingent Resource-Based Perspective of Supply Chain Resilience and Robustness. *Journal of Supply Chain Management*, Band 50, Nr. 3, 2014

[CZ18] CHEN, P.; ZHANG, X.: Research on the Risk Early Warning Method of Material Supplier Performance in Power Industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Band 108, 2018

[CTC24] CHIU, M.-C.; TAI, P.-Y.; CHU, C.-Y.: Developing a smart green supplier risk assessment system integrating natural language processing and life cycle assessment based on AHP framework: An empirical study. *Resources, Conservation and Recycling*, Band 207, 2024

[CS04] CHOPRA, S.; SODHI, M. S.: Managing Risk to Avoid SupplyChain Breakdown. *MIT Sloan Management Review*, 2004

[CP04] CHRISTOPHER, M.; PECK, H.: Building the Resilient Supply Chain. *The International Journal of Logistics Management*, Band 15, Nr. 2, 2004

[CC18] CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D.: *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, 5. Aufl. SAGE Publishing, LA, 2018

[DCR09] DEANE, J. K.; CRAIGHEAD, C. W.; RAGSDALE, C. T.: Mitigating environmental and density risk in global sourcing. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Band 39, Nr. 10, 2009

[Eul36] EULER, L.: *Comm. Acad. Science. Imp. Petrop.* Nr. 8, 1736

[Gan14] GANGULY, K.: Integration of analytic hierarchy process and Dempster-Shafer theory for supplier performance measurement considering risk. *International Journal of Productivity and Performance Management*, Band 63, Nr. 1, 2014

[GZ14] GUAN, H.; ZHAO, A.: Reduction and Optimization of Supplier Risk Indicators Based on Rough Set. *The Open Cybernetics & Systemics Journal*, Band 8, 2014

[HU24] HAN, N.; UM, J.: Risk management strategy for supply chain sustainability and resilience capability. *Risk Management*, Band 26, Nr. 2, 2024

[HLW+20] HAO, J.; LI, J.; WU, D.; SUN, X.: Portfolio optimisation of material purchase considering supply risk – A multi-objective programming model. *International Journal of Production Economics*, Band 230, 2020

[HKD+22] HELMOLD, M.; KÜÇÜK YILMAZ, A.; DATHE, T.; FLOURIS, T. G.: *Supply Chain Risk Management: Cases and Industry Insights. Management for Professionals*. Springer International Publishing, Cham, 2022 . Zugriffen: 4. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-90800-3>

[HZY+15] HO, W.; ZHENG, T.; YILDIZ, H.; TALLURI, S.: Supply chain risk management: a literature review. *International Journal of Production Research*, Band 53, Nr. 16, 2015

[Iso18] ISO: ISO 31000:2018 – Risk management – Guidelines. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 2018 . [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/65694.html>

[Iva20] IVANOV, D.: Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: A simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) case. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Band 136, 2020

[Iva23] IVANOV, D.: Einführung in die Widerstandsfähigkeit der Lieferkette. Springer International Publishing, Cham, 2023 .

[JWP+20] JUETTNER, U.; WINDLER, K.; PODLEISEK, A.; GANDER, M.; MELDAU, S.: Implementing supplier management strategies for supply chain sustainability risks in multinational companies. *The TQM Journal*, Band 32, Nr. 5, 2020

[Jüt05] JÜTTNER, U.: Supply chain risk management. *The International Journal of Logistics Management*, Band 16, Nr. 1, 2005

[KF18] KARA, M. E.; FIRAT, S. Ü. O.: Supplier Risk Assessment Based on Best-Worst. MDPI, Nr. 10, 2018

[KID+20] KINRA, A.; IVANOV, D.; DAS, A.; DOLGUI, A.: Ripple effect quantification by supplier risk exposure assessment. *International Journal of Production Research*, Band 58, Nr. 18, Taylor & Francis Ltd, Abingdon, 2020

[KST19] K.T., R.; SARMAH, S. P.; TAREI, P. K.: An integrated framework for the assessment of inbound supply risk and prioritization of the risk drivers: A real-life case on electronics supply chain. *Benchmarking: An International Journal*, Band 27, Nr. 3, 2019

[LWZ+21] LI, F.; WU, C.-H.; ZHOU, L.; XU, G.; LIU, Y.; TSAI, S.-B.: A model integrating environmental concerns and supply risks for dynamic sustainable supplier selection and order allocation. *Soft Computing*, Band 25, Nr. 1, 2021

[LWW+24] LO, H.-W.; WANG, L.-Y.; WENG, A. K.-W.; LIN, S.-W.: Assessing Supplier Disruption Risks Using a Modified Pythagorean Fuzzy SWARA–TOPSIS Approach. *Journal of Soft Computing and Decision Analytics*, Band 2, Nr. 1, 2024

[Loc19] LOCKAMY, A.: Benchmarking supplier external risk factors in electronic equipment industry supply chains. *Benchmarking: An International Journal*, Band 26, Nr. 1, 2019

[Loc14] LOCKAMY, A.: Assessing disaster risks in supply chains. *Industrial Management & Data Systems*, Band 114, Nr. 5, 2014

[May15] MAYRING, P.: Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken, 12., Überarbeitete Auflage. Beltz, Weinheim Basel, 2015 .

[MBM+19] MOKHTAR, S.; BAHRI, P. A.; MOAYER, S.; JAMES, A.: Supplier portfolio selection based on the monitoring of supply risk indicators. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Band 97, 2019

[ÖK22] ÖZTEK, G.; KABAK, M.: A Multi-Criteria Approach to Sustainable Risk Management of Supplier Portfolio: A Case Study at Defense Industry. *Gazi University Journal of Science*, Band 35, Nr. 4, 2022

[PH09] PONOMAROV, S. Y.; HOLCOMB, M. C.: Understanding the concept of supply chain resilience. *The International Journal of Logistics Management*, Band 20, Nr. 1, Emerald Group Publishing Limited, 2009

[PF24] PUSPITASARI, N. B.; FEBRIANI, V.: Integration of the AHP-TOPSIS Approach in Material Supplier Selection. *E3S Web of Conferences*, Band 517, 2024

[RP20] RETHLEFSEN, M. L.; PAGE, M. J.: PRISMA 2020 and PRISMA-S: common questions on tracking records and the flow diagram. *Journal of the Medical Library Association*, Band 110, Nr. 2, 2022

[RH20] ROMEIKE, F.; HAGER, P.: Erfolgsfaktor Risiko-Management 4.0: Methoden, Beispiele, Checklisten Praxishandbuch für Industrie und Handel. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020 . Zugegriffen: 5. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-29446-5>

[Rus11] RUSSELL-WALLING, E.: 50 Schlüsselideen Management. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2011. Zugegriffen: 20. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-8274-2637-6>

[SRM+24] SAPUTRO, T. E.; ROSIANI, T. Y.; MUBIN, A.; DEWI, S. K.; BAROTO, T.: Green supplier selection under supply risks using novel integrated fuzzy multi-criteria decision making techniques. Journal of Cleaner Production, Band 449, 2024

[SMV+23] SCHOENHERR, T.; MENA, C.; VAKIL, B.; CHOI, T. Y.: Creating resilient supply chains through a culture of measuring. Journal of Purchasing and Supply Management, Band 29, Nr. 4, 2023

[SR05] SHEFFI, Y.; RICE, J. B. J.: A Supply Chain View of the Resilient Enterprise. MIT Sloan Management Review, 2005

[TCW23] TAI, P.-Y.; CHIU, M.-C.; WEI, C.-J.: Developing a Green Supplier Risk Assessment System Applying Natural Language Processing and Life Cycle Assessment: An Empirical Study. P. Koomsap, A. Cooper, und J. Stjepandić, Hrsg., IOS Press, 2023, Zugegriffen: 10. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/ATDE230632>

[Tan06] TANG, C. S.: Robust strategies for mitigating supply chain disruptions. International Journal of Logistics Research and Applications, Band 9, Nr. 1, 2006

[TR18] TORRES-RUIZ, A.; RAVINDRAN, A. R.: Multiple criteria framework for the sustainability risk assessment of a supplier portfolio. Journal of Cleaner Production, Band 172, 2018

[TS11] TUMMALA, R.; SCHOENHERR, T.: Assessing and managing risks using the Supply Chain Risk Management Process (SCRMP). Supply Chain Management: An International Journal, Band 16, Nr. 6, 2011

[Urb19] URBANIAK, M.: Risk Factors Affecting Relations With Suppliers. Logforum, Band 15, Nr. 2, 2019

[UZM+22] URBANIAK, M.; ZIMON, D.; MADZIK, P.; ŠÍROVÁ, E.: Risk factors in the assessment of suppliers. PloS one, Band 17, Nr. 8, 2022

[VS13] VISWANADHAM, N.; SAMVEDI, A.: Supplier selection based on supply chain ecosystem, performance and risk criteria. International Journal of Production Research, Band 51, Nr. 21, 2013

[WB08] WAGNER, S. M.; BODE, C.: AN EMPIRICAL EXAMINATION OF SUPPLY CHAIN PERFORMANCE ALONG SEVERAL DIMENSIONS OF RISK. Journal of Business Logistics, Band 29, Nr. 1, John Wiley & Sons, Ltd, 2008

[WG21] WIEDENMANN, M.; GRÖBLER, A.: Supply risk identification in manufacturing supply networks. The International Journal of Logistics Management, Band 32, Nr. 2, Emerald Publishing Limited, 2021

[Wie21] WIELAND, A.: Dancing the Supply Chain: Toward Transformative Supply Chain Management. Journal of Supply Chain Management, Band 57, Nr. 1, 2021

[WSA+23] WÖHNER, H.; SCHUPP, F.; ARNOLD, M.; KHOLIKOVA, B.; SCHICK, A.: Supplier Risk Tower: The Vigilant Eye on Supply Chains. Band 21, O. Khan, M. Huth, G. A. Zsidisin, und M. Henke, Hrsg., Springer Series in Supply Chain Management, vol. 21., Springer International Publishing, Cham, 2023, S. 151–171, Zugegriffen: 10. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-16489-7_9

[WZB23] WU, C.; ZOU, H.; BARNES, D.: A supply risk perspective integrated sustainable supplier selection model in the intuitionistic fuzzy environment. Soft Computing, Band 27, Nr. 20, 2023

[Zsi03] ZSIDISIN, G. A.: A grounded definition of supply risk. Journal of Purchasing and Supply Management, Band 9, Nr. 5–6, 2003

Autoren

Sarah Maria Lang ist wissenschaftliche Mitarbeiterin an der HfWU an der Fakultät Betriebswirtschaft und Internationale Finanzen (FBF) und promoviert kumulativ an der TU Bergakademie Freiberg (TUBAF) unter der Betreuung von Prof. Dr. Simon Glöser-Chahoud. In ihrer Forschung beschäftigt sie sich mit Strategien zur Resilienzsteigerung und Risikominderung in globalen Lieferketten, insbesondere unter Anwendung simulationsbasierter Modellierung und der Integration Künstlicher Intelligenz.

Prof. Dr. Christoph Zanker ist Professor für Innovations- und Produktionsmanagement an der Fakultät Betriebswirtschaft und Internationale Finanzen der Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU). In seiner Forschung und Lehre befasst er sich mit den Themenfeldern Innovationsprozesse, industrielle Wertschöpfung sowie der Transformation von Produktionssystemen im Kontext von Nachhaltigkeit und Widerstandsfähigkeit. Er bringt seine langjährige Erfahrung aus anwendungsorientierten Forschungsprojekten in Zusammenarbeit mit Industriepartnern ein und engagiert sich in der Entwicklung zukunftsorientierter Lösungsansätze für ein resilientes Produktionsmanagement.

Prof. Dr. Simon Glöser-Chahoud ist Professor für ABWL, insbesondere Corporate Sustainability and Environmental Management an der TU Bergakademie Freiberg (TU BAF). Neben Themen der nachhaltigen industriellen Wertschöpfung befasst er sich in seiner Forschungsarbeit auch mit quantitativen Modellen zur Darstellung von Risiko- und Resilienz in Lieferketten, insbesondere in Zusammenhang mit der Versorgung kritischer Rohstoffe.

Prof. Dr. Marcus Wiens ist Professor für ABWL, insbesondere Innovations- & Risikomanagement an der TU Bergakademie Freiberg (TU BAF). Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Resilienz vernetzter und komplexer Systeme (insb. Marktsysteme und Supply Chain-Netzwerke, kritische Infrastrukturen sowie Cybersicherheit und Cyberresilienz). Als studierter Volkswirt setzt er dabei neben Methoden des Operations Research auch Spieltheorie sowie experimentelle Verhaltensforschung (Behavioral Economics) ein.

Session VII

Upgradefähige mechatronische Systeme – Eine Unterstützung zur Priorisierung von Entwicklungsaktivitäten auf Basis sich ändernder Produkteigenschaften

**Maximilian Kuebler¹, Maximilian Bräuner¹, Carsten Thümmel¹, Andreas Siebe¹,
Tobias Düser¹, Albert Albers¹**

¹ IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT, maximilian.kuebler@kit.edu,
maximilian.braeuner@student.kit.edu, carsten.thuemmel@kit.edu, andreas.siebe@kit.edu,
tobias.dueser@kit.edu, albert.albers@kit.edu

Zusammenfassung

Dynamik und Unsicherheit in technischen und wirtschaftlichen Umfeldern sind heute zentrale Treiber dafür, dass die Fähigkeit zur flexiblen Anpassung von Produkten an sich verändernde Anwender- und Kundenanforderungen sowie Umfeldbedingungen zunehmend an Bedeutung gewinnt. Gleichzeitig steigt der Druck, Produkte nachhaltiger zu gestalten. Upgrades leisten hierzu einen wesentlichen Beitrag, da sie eine ökoeffiziente Weiternutzung von Produktsubstanz ermöglichen und den Ressourcenverbrauch im Vergleich zu Neuentwicklungen deutlich senken. Eine zentrale Herausforderung in der Planung von Upgrades besteht darin, zukünftige Eigenschaftsänderungen frühzeitig zu antizipieren sowie zielgerichtet in die Planung und Produktentwicklung zu integrieren. Insbesondere aufgrund ihrer hohen Komplexität spielt diese Fähigkeit bei cyber-physischen Systemen eine besondere Rolle, da sie mechanische und informationstechnische Komponenten integrativ vereinen. Dies erfordert eine geeignete, modular aufgebaute Produktarchitektur, die Änderungen gezielt zulässt und unterstützt.

Der vorliegende Beitrag stellt einen Ansatz zur systematischen Priorisierung von Entwicklungsaktivitäten vor, der auf der Analyse potenzieller Eigenschaftsänderungen basiert und eine strategische Planung von Upgrades unterstützt. Aufbauend auf der bestehenden Systematik nach KUEBLER et al. (2023) wird der Ansatz um eine Bewertung von Systemkomplexität und Veränderungsaufwand erweitert, die sowohl Einzeländerungen als auch deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem berücksichtigt. Dadurch entsteht eine methodische Verknüpfung zwischen vorausschauenden Planungselementen und der iterativen Entwicklung der Produktarchitektur. Der Ansatz wird anhand einer experimentellen Studie sowie am Demonstrator des Sonderforschungsbereichs Convide angewendet und validiert. Die Ergebnisse zeigen das Potenzial, Entwicklungsaufwände frühzeitig zu antizipieren und upgradefähige Produkte systematisch zu gestalten.

Schlüsselworte

Upgrade, Nachhaltige Produktentwicklung, Strategische Produktplanung

Upgradeable Mechatronic Systems – A Support for Prioritizing Development Activities Based on Changing Product Properties

Abstract

Dynamics and uncertainty in technical and economic environments are key drivers today for the increasing importance of the ability to flexibly adapt products to changing user and customer requirements as well as to evolving environmental conditions. At the same time, there is growing pressure to design products more sustainably. Upgrades make a significant contribution to this effort by enabling the eco-efficient continued use of product substance and significantly reducing resource consumption compared to new developments. A central challenge in planning upgrades lies in anticipating future changes in product properties at an early stage and purposefully integrating them into planning and product development. This capability is particularly crucial for cyber-physical systems due to their high complexity, as they integratively combine mechanical and information technology components. This requires a suitable, modular product architecture that specifically accommodates and supports changes.

This paper presents an approach for the systematic prioritization of development activities based on the analysis of potential changes in product properties, thereby supporting the strategic planning of upgrades. Building on the existing framework by KUEBLER et al. (2023), the approach is extended by incorporating an evaluation of system complexity and modification effort, which considers both individual changes and their impact on the overall system. This creates a methodological link between foresight-based planning elements and the iterative development of product architecture. The approach is applied and validated through an experimental study and a demonstrator of the Collaborative Research Center Convide. The results highlight the potential to anticipate development efforts early on and to systematically design upgradeable products.

Keywords

Upgrade, Sustainable Product Development, Strategic Product Planning

1 Einleitung

Nach LENK & ZELEWSKI droht die Unternehmensplanung rasch an Relevanz zu verlieren, sofern sie die zeitlich begrenzte Marktpräsenz von Produkten nicht berücksichtigt [LZ00]. Stetig wandelnde Rahmenbedingungen, wie etwa die Entwicklung neuer Technologien oder sich verändernde Marktumfelder, führen zu wachsenden Herausforderungen für das Innovationsmanagement von Unternehmen [FS16]. Die Produktanforderungen werden durch die zunehmende Marktsegmentierung, individuellere Kundenbedürfnisse und beschleunigte Technologiezyklen immer komplexer [BES+12]. Der Trend zu verkürzten Produktlebenszyklen, der mit einem erhöhten Materialverbrauch und einer gesteigerten Abfallproduktion einhergeht [BWH+14], gefährdet zunehmend das Ziel einer nachhaltigen Produktentwicklung [SKK+23]. Vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung und der dadurch wachsenden Bedeutung nachhaltiger Wertschöpfung ist es notwendig, Produkte zukunftsrobust zu gestalten [SGS+22]. Ein Ansatzpunkt der nachhaltigen Produktentwicklung liegt in der gezielten Optimierung des Ressourceneinsatzes über den gesamten Produktlebenszyklus. Dies kann unter anderem durch geplante und nachgelagerte Produktanpassungen in der Nutzungsphase, sog. Upgrades, erreicht werden. Upgrades bieten die Möglichkeit, Produkte funktional und technologisch auf dem aktuellen Stand zu halten, um sie situations- und bedarfsgerecht an neue Anforderungen der Nutzenden anzupassen [ADK+23]. Die daraus resultierende Verlängerung der Nutzungsphase trägt zur Ressourcenschonung bei und verbessert die ökologische Bilanz des Produkts [AWR+15]. Während Software-Updates durch die verbaute Rechenkapazität begrenzt sind, erfordern Upgrades physische Änderungen an Komponenten oder Subsystemen. Um deren Realisierbarkeit in der Nutzungsphase sicherzustellen, müssen entsprechende Gestaltungsspielräume bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung systematisch mitgedacht werden [ADK+23]. Trotz einer Vielzahl an Unterstützungsansätzen fehlt es bislang an konkreten Vorgehensweisen, mit denen Entwicklungsteams mögliche Upgradepfade vorausschauend planen und strukturieren können [AWR+15].

Der Fokus des vorliegenden Beitrags liegt auf der nachgelagerten Anpassung von Systemen durch Upgrades. Ein erster Ansatz zur Bewertung und Planung von Upgrades wurde von KUEBLER ET AL. entwickelt [KSS+23, KTS+23, KTT+24]. Dieser erlaubt eine Einschätzung der Zukunftsrobustheit gegenüber zukünftigen Anforderungen auf der Ebene von Produkteigenschaften. Eine systematische Verknüpfung mit der Priorisierung von Entwicklungsaktivitäten durch die Integration von strategischer Produktplanung und Produktentwicklung ist im aktuellen Stand jedoch nur initial realisiert. Vor diesem Hintergrund wird im vorliegenden Beitrag ein weiterführender Ansatz entwickelt und untersucht.

2 Stand der Forschung

Im Bereich der Produktentwicklung existieren bereits Ansätze, welche Systeme unter Berücksichtigung zukünftiger Einflüsse gestalten. FRICKE und SCHULZ schlagen in diesem Kontext *Design for Changeability* vor, welches als paralleler Prozess zur Produktarchitekturentwicklung verstanden wird. Anstatt Änderungen während des Produktlebenszyklus zu vermeiden,

stellen die Autoren fest, dass Anpassung in vielen Umfeldern unvermeidbar ist, um den langfristigen Erfolg des Produkts sicherzustellen. Sie folgern, dass ein Produkt anpassbar sein muss, und definieren hierfür vier Aspekte: *Robustheit, Adaptierbarkeit, Flexibilität und Agilität* [FS05].

Robustheit und Adaptierbarkeit kennzeichnen die Fähigkeit des Systems, sich selbst an die Umfeldveränderungen anzupassen. Flexibilität und Agilität hingegen beschreiben die Anpassbarkeit von außen, wie sie im Rahmen von Upgrades realisiert wird. Während Flexibilität die grundsätzliche Leichtigkeit einer Veränderung beschreibt, steht Agilität für die Geschwindigkeit, mit der eine solche Veränderung implementiert werden kann [FS05]. Eingangs wurden Upgrades als nachgelagerte Produktanpassungen in der Nutzungsphase beschrieben. Damit erfüllen sie insbesondere die Charakteristika Flexibilität und Agilität.

Im Kontext mechatronischer Systeme wird ein *Upgrade* als eine Modifikation eines Systems verstanden, welche das Ziel hat, die Benutzerfreundlichkeit und Leistungsfähigkeit während der Nutzungsphase zu erhöhen. Dies dient der Verlängerung der Gebrauchsduer und berücksichtigt zugleich die sich wandelnden Bedürfnisse von Kunde, Anwender und Anbieter [ADK+23]. Die Implementierung eines Upgrades kann, abhängig von dessen Art, durch Fachpersonal, den Hersteller oder den Nutzer selbst erfolgen [KW19]. Voraussetzung dafür ist, dass das Produkt bereits im Entwurf für Upgrades ausgelegt ist.

2.1 Grundlagen der Produktentstehung

Die Produktentstehung umfasst die Aktivitäten der strategischen Produktplanung, der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung zu Beginn des Produktlebenszyklus [AG12]. In der frühen Phase des Produktlebenszyklus lassen sich Produkteigenschaften am stärksten beeinflussen und mit dem geringsten Aufwand anpassen. Gleichzeitig besteht jedoch ein erheblicher Mangel an Wissen über zukünftige Eigenschaften, wodurch ein hohes Maß an Unsicherheit entsteht. Dieses Phänomen wird als Paradoxon der Konstruktion bezeichnet [EM17]. Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung bietet eine Möglichkeit zur Überwindung dieses Paradoxons und erlaubt die Beschreibung eines Großteils realer Entwicklungsprojekte auf der Basis zweier Hypothesen [ABW15]. Zunächst werden Systeme auf Basis eines Referenzsystems entwickelt, welches Referenzsystemelemente enthält. Diese Referenzsystemelemente können aus eigenen Vorgänger- oder konkurrierenden Produkten, aus anderen Branchen oder aus der Forschung stammen. Zweitens dient das Referenzsystem zur Entwicklung neuer Produkt- oder Systemgenerationen, wobei drei verschiedene Variationstypen zur Verwendung der Referenzsystemelemente zum Einsatz kommen: Übernahmevariation, Attributvariation und Prinzipvariation [AR22]. Neben der Funktion als Beschreibungsmodell kann das Modell der SGE auch zur Risikobewertung oder zur Ableitung relevanter Validierungsumfänge eingesetzt werden. Attribut- und Prinzipvariation werden gemeinsam als „Neuentwicklungsanteil“ klassifiziert. Anhand des ermessenen Neuentwicklungsaufwands gegenüber dem verfügbaren Wissen wird eine Risikoeinschätzung des Entwicklungsprojekts ermöglicht [ARB17].

2.2 Grundlagen der Systemkomplexität

Die Aktivität, Produkte nachgelagert anpassen zu können, erfordert ein grundlegendes Verständnis des Systems sowie dessen Komplexität. Unterschiedliche Ansätze des Systems Engineering eignen sich, um Systeme sowie deren Komplexität zu beschreiben. Ein Ansatz der Modellierung im Systems Engineering stellt der RFLP-Ansatz dar. Der Ansatz unterstützt eine modellbasierte Systementwicklung durch die Betrachtung von vier Sichten. Dabei werden Anforderungen (R – Requirements), eine funktionale Sicht (F – Functional), eine logische Architekturensicht (L – Logical) sowie eine physische Sicht (P – Physical) zur Systembeschreibung herangezogen [KK13]. Um unterschiedliche, generationsübergreifende Perspektiven auf die Entwicklung von Systemen zu ermöglichen, führen ALBERS et al. das Referenzmodell in Bezug auf das Modell der SGE ein [AHF+20]. In diesem Ansatz wird die Systemsicht in drei Perspektiven unterteilt: die Eigenschaftssicht, die Funktionssicht und die physische Sicht [AHF+20] (siehe Bild 1). Die Eigenschaftssicht umfasst lösungsoffene Produkteigenschaften, die vom Kunden wahrgenommen werden können und bspw. aus Ergebnissen von Vorausschau stammen können. Diese Produkteigenschaften lassen sich über Produktfunktionen in der Funktionssicht konkretisieren. Die Produktfunktionen bzw. Teilstrukturen wiederum können durch lösungsspezifische technische Subsysteme realisiert werden, die in der physischen Sicht verortet sind [AHF+20, AFH+20]. Ist das System im Referenzmodell abgebildet, so erlaubt es Rückschlüsse auf die Systemkomplexität zu ziehen.

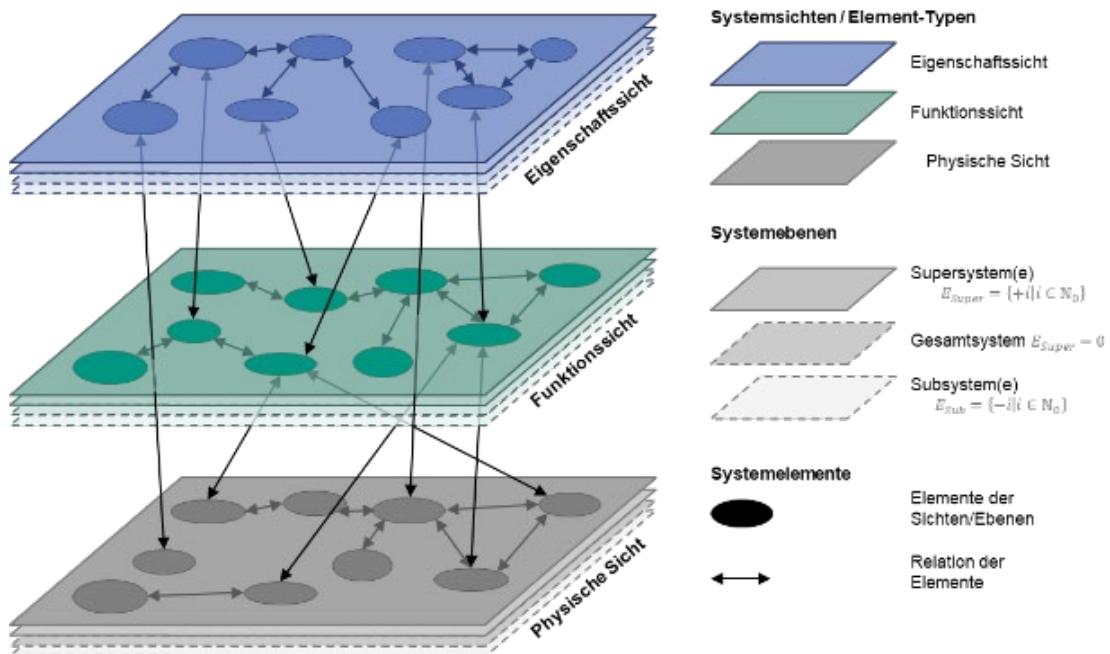


Bild 1: Referenzmodell nach ALBERS et al. [AHF+20]

Zur Bewertung und Beschreibung technischer Systeme kann die strukturelle Komplexität herangezogen werden. Diese beschreibt die Komplexität der Systemarchitektur unter Berücksichtigung der Anzahl, Art und Anordnung der Systemelemente sowie deren Interaktionen [DOR02]. Ein differenzierter Ansatz zur Quantifizierung dieser Komplexität wurde von SINHA und DE WECK entwickelt [SD13]. Der Ansatz schlägt eine Metrik vor, die den steigenden Ent-

wicklungsaufwand in Relation zur strukturellen Komplexität erfassbar macht. Er gilt als besonders geeignet, da er die neun von WEYUKER definierten Kriterien für valide Komplexitätsmetriken erfüllt [WEY88]. Die Metrik dient dabei als Unterstützung im Komplexitätsmanagement, indem sie Systeme anhand ihrer strukturellen Eigenschaften charakterisiert und analysiert. Sie setzt sich aus drei Komponenten zusammen:

$$C = C_1 + C_2 C_3 = \sum_{i=1}^n \alpha_i + \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{i,j} A_{i,j} \right) \gamma E(A) \quad (1)$$

Die Komponentenkomplexität C_1 bewertet jede Systemkomponente über eine interne Komplexität α und summiert diese über alle Systemelemente. C_2 , die Schnittstellenkomplexität, basiert auf einer Bewertung jeder Verbindung durch eine Schnittstellenkomplexität β . C_3 , die topologische Komplexität, beschreibt die Struktur des System-Graphen durch eine Adjazenzmatrix. Diese wird mittels der Graphenenergie, berechnet aus den Singulärwerten der Matrix, zu einer Kennzahl verdichtet, welche die topologische Architektur des Systems charakterisiert [SD13]. Dieser Ansatz erlaubt eine differenzierte Analyse, die sowohl lokale als auch systemweite Aspekte der Komplexität berücksichtigt.

2.3 Grundlagen der Vorausschau

Eine Möglichkeit, die Wissenslücke in der Eigenschaftssicht des Referenzmodells hinsichtlich zukünftiger Produkteigenschaften zu adressieren, liegt in der Anwendung von Methoden der Vorausschau. Da die Zukunft stets mit Wandel verbunden und nicht exakt vorhersagbar ist [SFA12], kommen je nach betrachtetem Zeithorizont unterschiedliche Methoden der strategischen Vorausschau zum Einsatz. Mit zunehmendem Planungshorizont steigt die Unsicherheit und die Planbarkeit nimmt ab [FS16]. Prognosen basieren auf gegenwärtigen Zuständen und Vergangenheitsdaten und sind vor allem für kurzfristige Zeiträume geeignet. Trends hingegen beschreiben wahrscheinliche Entwicklungen mit mittelfristigem Zeithorizont [GDE+19]. Für lange Planungshorizonte sind Szenarien geeignet. Sie beschreiben mögliche Zukünfte unter Berücksichtigung komplexer Einflussfaktoren. Dies ist insbesondere bei mechatronischen Systemen und modularen Produktarchitekturen mit Lebenszyklen über zehn Jahre relevant [FS16]. Zur Entwicklung von Szenarien kann das Szenariomanagement nach FINK & SIEBE herangezogen werden [FS16]. Szenarien lassen sich auch im Innovationsprozess zur Potenzialbewertung einsetzen. FINK & SIEBE schlagen hierzu ein Vier-Quadranten-Modell des strategischen Innovationsmanagements vor, das Szenarien mit externen, nicht beeinflussbaren Schlüsselfaktoren verknüpft. Es differenziert zwischen Umwelt-, Kunden-, Strategie- und Produktszenarien [FS16].

2.4 Bestehende Produktentwicklungsansätze zur Berücksichtigung zukünftiger Systemeinflüsse

Wie eingangs im Kontext des Design for Changeability eingeführt, gibt es mehrere Optionen, Produkte veränderungsfähig zu gestalten. Um anpassungsfähige Produkte zu entwickeln, stellen ENGEL, BROWNING und REICH einen Ansatz zur Gestaltung adaptiver Produktarchitekturen (DFA – Design for Adaptability) vor. Zentrales Element ist das Konzept des Architecture Adaptability Value, das den Nutzen zukünftiger Änderungsoptionen mit den Kosten zusätzlicher

Schnittstellen verrechnet [EBR17]. Obwohl der Ansatz eine strukturierte Operationalisierung der bislang überwiegend konzeptionellen Diskussion um Modularität bietet, integriert der Ansatz keine Antizipation zukünftiger Einflüsse. Einen weiteren Ansatz zur Entwicklung anpassungsfähiger Produkte stellen MARTINEZ und XUE vor, der modulare Gestaltung mit Optimierungsmethoden kombiniert. Zentrales Element ist die Abbildung von Produktkonfigurationen über den gesamten Lebenszyklus hinweg mittels hybrider AND-OR-Bäume. Komponenten werden basierend auf ähnlichen Lebenszykluseigenschaften zu Modulen gruppiert, um spätere Anpassungen, Rekonfigurationen oder Erweiterungen zu erleichtern. Es wird Zielsetzung verfolgt, Produkte so auszulegen, dass sie bei minimalen Schnittstellenaufwänden eine hohe Anpassungsfähigkeit über ihren Lebenszyklus hinweg besitzen [MX16]. Während der methodische Rahmen ein konsistentes Vorgehen bietet, liegt der Fokus stark auf Modellierung und Optimierung, sodass ebenfalls eine Antizipation zukünftiger Einflüsse ausbleibt. MÖRTL erarbeitet einen Ansatz zur Entwicklung upgradefähiger Produkte. Dieser Ansatz umfasst fünf Schritte: Identifikation, Analyse, Bewertung, Entscheidung und Umsetzung. Die Analyse zukünftiger Anforderungen erfolgt unter Verweis auf Methoden der Vorausschau mit dem Ziel der Identifikation und Bewertung zukünftiger Produkteigenschaften. Die abgeleiteten Erkenntnisse fließen in die Auswahl und Ausgestaltung möglicher Upgrades ein [MÖR04]. Obwohl MÖRTL den strategischen Umgang mit Unsicherheit adressiert, bleibt eine methodische Beschreibung und Umsetzung des Vorgehens aus. Eine vernetzte Betrachtung zwischen zukunftsorientierter Eigenschaftssicht und physischer Systemsicht wird daher nicht erreicht.

Dieser Beitrag stützt sich auf den Ansatz von KUEBLER ET AL., der darauf abzielt, sich verändernde Produkteigenschaften zu identifizieren und zu klassifizieren, um daraus Handlungsempfehlungen für die Upgrade-Planung abzuleiten [KSS+23, KTS+23, KTT+24]. Die Systematik umfasst vier Schritte: IST-Analyse, SOLL-Analyse, Delta-Analyse und Upgrade-Synthese (siehe Bild 2). In der IST-Analyse wird das heutige Produkt sowie laufende Entwicklungen betrachtet, um die Kernkompetenzen und aktuelle Produktmerkmale zu erfassen. Die SOLL-Analyse analysiert zukünftige Kunden-Umfeld-Entwicklungen und generiert zukünftig relevante Produktmerkmale unter Verwendung von Kundenumfeld- und Produktszenarien. Die Delta-Analyse dient schließlich der Identifikation unsicherer, sich potenziell ändernder Produkteigenschaften durch Abgleich der beiden Szenarienarten. Die Produkteigenschaften werden hinsichtlich ihres Veränderungspotenzials in statisch bzw. dynamisch klassifiziert und anhand des SGE-Risikoportfolios bzgl. Ihres Entwicklungsrisikos bewertet. Abschließend wird unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse in der Upgrade-Synthese eine Systembeschreibung erarbeitet. Hierzu wird die Modularisierung nach STONE et al. [SWC00] in einer Workshop-basierten Ansatz überführt. Auf Basis der Produkteigenschaften werden heutige und zukünftige Funktionen sowie (Sub-)systeme beschrieben und in eine Architektur überführt. Abschließend wird auf Basis des eingeschätzten Zusammenhangs der dynamischen Merkmale mit den Subsystemen eine Priorisierung der Entwicklungaktivitäten durchgeführt.

3 Forschungsbedarf und methodisches Vorgehen

Die Vorarbeit KUEBLER ET AL. [KSS+23] verdeutlicht die Notwendigkeit, strategische Vorausschau in der Produktentwicklung systematisch mit der Ableitung konkreter technischer Systeme zu verknüpfen. Zwar wird ein erster methodischer Rahmen geschaffen, der eine Integration ermöglicht, jedoch bleibt eine explizite Verbindung zur Systemebene offen. KUEBLER ET AL. [KTT+24] greift diesen Ansatz auf und erweitert ihn dahingehend, dass Entwicklungsaktivitäten differenziert abgeleitet werden. Die zugrunde liegende Systemkomplexität wird dabei jedoch nur implizit berücksichtigt, sodass die Ableitung priorisierter Entwicklungsaktivitäten weitgehend losgelöst von der tatsächlichen Systemkopplung der betrachteten Produkteigenschaften erfolgt. In der bestehenden Systematik fehlt somit ein belastbarer Indikator, der die Systemkomplexität erfasst und als Grundlage für eine fundierte Priorisierung im Rahmen der strategischen Produktentwicklung dient.

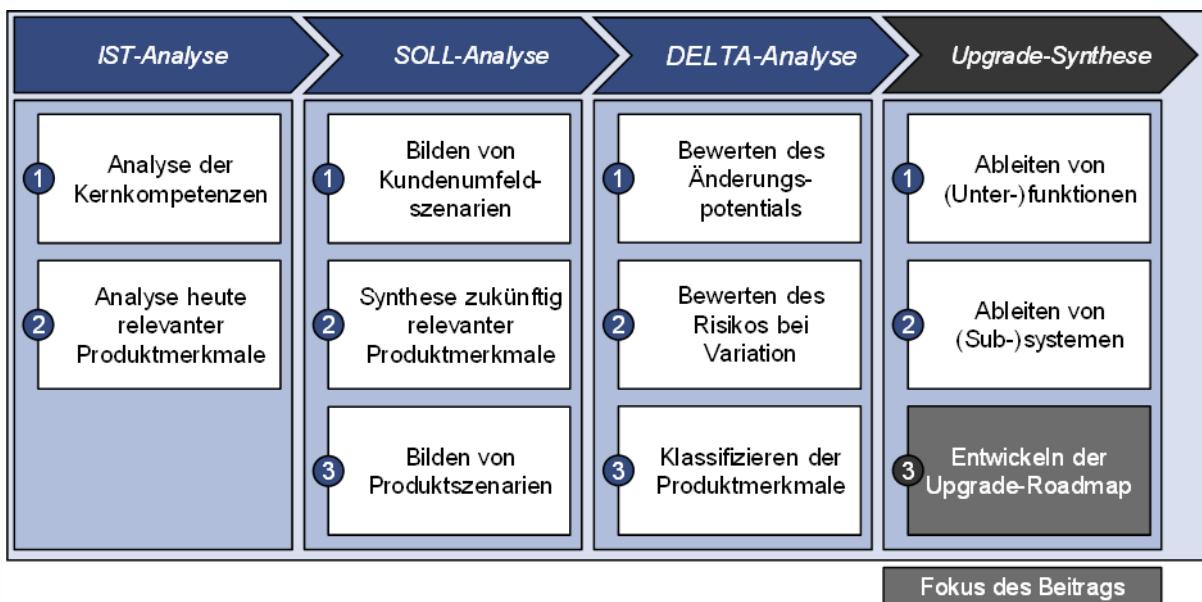


Bild 2: Referenzprozessmodell zur Planung von Upgrades, angepasste Darstellung [KTT+24]

Zur Operationalisierung dieses Forschungsbedarfs werden folgende Forschungsfragen abgeleitet:

- Wie können Eigenschaftsänderungen systematisch mit funktionalen und strukturellen Aspekten eines Systems verknüpft werden, um deren Auswirkungen auf die Architektur zu analysieren?
- Wie lässt sich ein Indikator entwickeln und anwenden, der die Auswirkungen potenzieller Eigenschaftsänderungen auf die Gesamtarchitektur eines Produkts quantifizierbar macht und zur strategischen Planung von Upgrades beiträgt?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde ein methodisches Vorgehen gewählt, das sich an der Design Research Methodology (DRM) nach BLESSING & CHAKRABARTI orientiert

[BC09]. In der Phase der Research Clarification wurde ein grundlegendes Verständnis des Untersuchungsgegenstands aufgebaut. Dies beinhaltete insbesondere eine systematische Aufarbeitung der theoretischen Grundlagen in den Bereichen Produktentwicklung, strategische Vorausschau und Komplexitätsmanagement. Im Rahmen einer ersten deskriptiven Studie erfolgte eine Analyse der bestehenden Systematik zur Bewertung sich verändernder Produkteigenschaften. Diese wurde durch alternative Ansätze zur Bewertung von Systemkomplexität ergänzt, die auf Grundlage der vorangegangenen Literaturrecherche identifiziert wurden. Ziel war es, belastbare Indikatoren zur Quantifizierung des Komplexitätseinflusses von Eigenschaftsänderungen abzuleiten. In der anschließenden präskriptiven Phase wurde der geeignete Bewertungsansatz in die bestehende Systematik integriert. Eine zweite deskriptive Studie diente der empirischen Evaluation der weiterentwickelten Systematik anhand zweier Anwendungsbeispiele: einer Fallstudie am Beispiel einer Kaffeemaschine sowie einer Implementierungsstudie im Kontext des Sonderforschungsbereichs (SFB) 1608 <Convide>. Letztere erfolgte exemplarisch am Beispiel eines Bremssystems aus der Automobilindustrie. Die Auswertung der Ergebnisse beider Studien erlaubte eine abschließende Beurteilung der erweiterten Systematik in Bezug auf ihre Eignung zur Unterstützung einer vorausschauenden und systematisch priorisierten Upgrade-Planung.

4 Ergebnisse aus der Weiterentwicklung und Anwendung der Systematik

Zur fundierten Bewertung und Priorisierung von Upgrades wurde der Ansatz nach KUEBLER ET AL. [KSS+23, KTS+23, KTT+24] um eine dritte Dimension, der Systemkomplexität, erweitert. Aufbauend auf der Klassifikation in statische und dynamische Merkmale sowie der Bewertung des Entwicklungsrisikos ergibt sich ein dreidimensionaler Bewertungsraum, der eine strukturierte Entscheidungsunterstützung ermöglicht. In Abschnitt 4.1 wird zunächst die Herleitung und Integration dieser drei Dimensionen in der weiterentwickelten Systematik eingeführt bevor deren Anwendung in zwei Studien in 4.2 dargelegt wird.

4.1 Weiterentwicklung der Systematik

Wie im Stand der Forschung dargelegt nutzt der Ansatz nach KUEBLER ET AL. seither zwei Größen zur Priorisierung der Entwicklungsaktivitäten. Hierbei wurde noch keine explizite Interaktion der Produkteigenschaften im System berücksichtigt, welche dadurch entsteht, dass unterschiedliche Subsysteme diese Eigenschaften adressieren und erfüllen können. Um diese Interaktion konkretisiert beschreiben und bewerten zu können, wurde eine Beschreibung der Systemkomplexität in der Priorisierung der Entwicklungsaktivitäten von Upgrades ergänzt. Folglich ergeben sich nunmehr drei Größen, anhand welcher die Priorisierung von Upgrades im letzten Schritt des Ansatzes erfolgen kann:

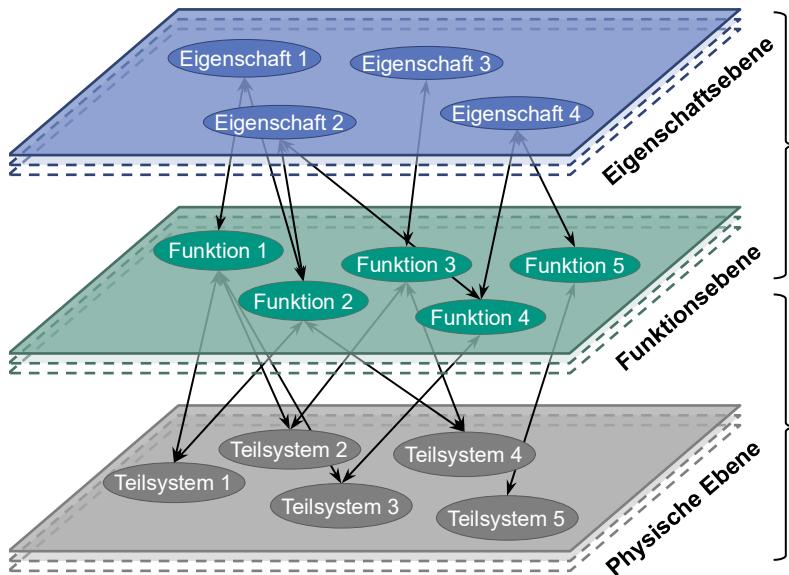
- Änderungspotenzial: Diese Dimension unterscheidet zwischen zeitlich statischen und zeitlich dynamischen Produktmerkmalen basierend auf Erkenntnissen der Szenariotechnik. Hierzu wird die zukünftige Relevanz von Produktmerkmalen durch die systematische Gegenüberstellung von Produkt- und Kundenumfeldszenarien bewertet. Produktmerkmale,

welche keine dominante Ausprägung in der Bewertung ergeben, werden als dynamisch klassifiziert, die weiteren als statisch [KSS+23, KTS+23].

- Entwicklungsrisiko: Diese Dimension ergibt sich auf Basis des SGE-Risikoportfolios [KTS+23]. Sie wird ermittelt aus der Gegenüberstellung des Neuentwicklungsanteil gemäß Modell der SGE als dem vorhandenen Wissen [ARB17]. Das Portfolio unterteilt dabei in neun Stufen [MAR21].
- Vernetzungsgrad: Diese Dimension beschreibt die Systemkomplexität, welche auf die betrachtete Produkteigenschaft wirkt. Hierfür erfolgt die Bewertung der strukturellen Koppelung jeder Produkteigenschaft anhand der drei Ebenen des Referenzmodells. Die Abhängigkeiten von Eigenschafts- und Funktionssicht sowie die der Funktions- und physischen Sicht werden anhand einer auf das Referenzmodell angepassten Komplexitätszahl nach SINHA & DE WECK [SD13] quantifiziert.

Genauer ergibt sich der Vernetzungsgrad aus zwei Bewertungen der Abhängigkeiten zwischen den Ebenen des Referenzmodells (siehe Bild 3). Das zugehörige Vorgehensmodell sieht ein paralleles Vorgehen und Diskutieren der Bewertungen im Produktentwicklungsteam vor. Zur Bestimmung der Verbindungen zwischen diesen Ebenen werden zwei binäre Matrizen erstellt: eine Eigenschaft-Funktions-Matrix und eine Funktions-Teilsystem-Matrix. Die Elemente werden jeweils binär hinsichtlich Ihrer Vernetzung bewertet (vernetzt/ nicht vernetzt). Ausgehend von diesen Matrizen wird für jede betrachtete Produkteigenschaft eine spezifische Matrix gebildet, welche nur jene Funktionen und Teilsysteme einbezieht, die in direktem Zusammenhang mit der Eigenschaft stehen.

Referenzmodell eines Beispielsystems



Bewertungsmatrizen zwischen den Ebenen

		Eigenschaft 1	Eigenschaft 2	Eigenschaft 3	Eigenschaft 4
Funktion 1	Eigenschaft 1	1	0	0	0
	Eigenschaft 2	1	1	0	0
Funktion 3	Eigenschaft 1	0	0	1	0
	Eigenschaft 2	0	1	0	1
Funktion 5	Eigenschaft 1	0	0	0	1
	Eigenschaft 2	0	0	0	1

		Funktion 1	Funktion 2	Funktion 3	Funktion 4	Funktion 5
Teilsystem 1	Funktion 1	1	1	0	0	0
	Funktion 2	1	0	1	0	0
Teilsystem 3	Funktion 1	1	0	0	1	0
	Funktion 2	0	1	1	0	0
Teilsystem 5	Funktion 1	0	0	0	0	1
	Funktion 2	0	0	0	0	1

Bild 3: Vorgehen zur Bewertung des Vernetzungsgrads

Auf Grundlage dieser Matrix erfolgt die Berechnung der strukturellen Komplexitätskomponenten C1, C2 und C3 in Anlehnung an SINHA & DE WECK [SD13]. C1 beschreibt in dieser Variante die Summe der Komplexitätswerte der beteiligten Funktionen. Eine Gewichtung der Funktionen durch individuelle Werte α ist optional möglich. C2 wird als Maß für die Schnittstellenkomplexität über die Anzahl der vorhandenen Verbindungen in der merkmalsspezifischen Matrix bestimmt. Die topologische Komplexität C3 ergibt sich aus der Energie des entsprechenden Adjazenzgraphen, berechnet als Summe der Singulärwerte und normiert über die Anzahl der Knoten. Der Vernetzungsgrad ergibt sich abschließend gemäß Formel (1). Diese Vorgehensweise erlaubt eine differenzierte Bewertung der strukturellen Einbindung einzelner Produkteigenschaften innerhalb des Gesamtsystems.

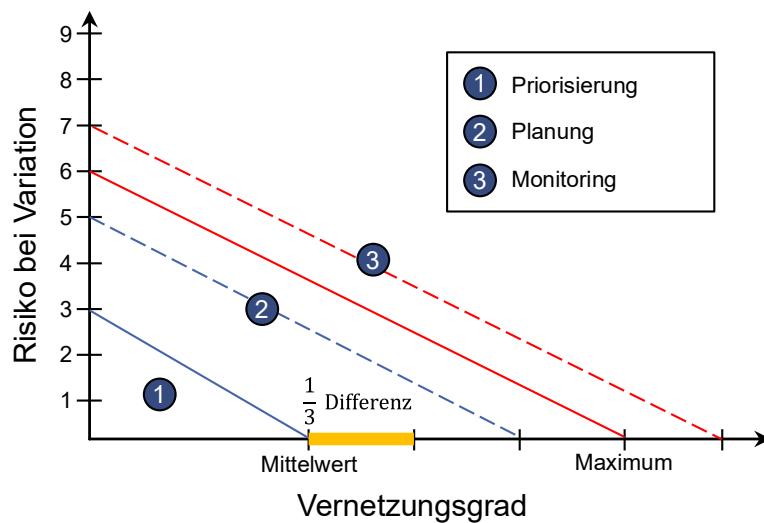


Bild 4: Prioritätsklassen zur Ableitung von Entwicklungsaktivitäten

Zur Ableitung gezielter Entwicklungsaktivitäten werden die Eigenschaften in drei Prioritätsklassen eingeordnet: *Umsetzung*, *Planung* und *Monitoring* (siehe Bild 4). Die Klassen ergeben sich anhand der beiden Dimensionen *Risiko bei Variation* und *Vernetzungsgrad*. Die Größe Änderungspotenzial stellt eine Entscheidungsunterstützung zur Upgradeplanung durch Kennzeichnung der klassifizierten Eigenschaften dar. Die Zuweisung der Priorität erfolgt über definierte Schwellenwerte in beiden Dimensionen. Der Bereich *Umsetzung* (Prioritätsklasse 1) umfasst Eigenschaften mit niedrigem Entwicklungsrisiko und geringer struktureller Einbindung. Änderungen an dynamischen Eigenschaften innerhalb dieses Bereichs können bevorzugt durch Upgrades realisiert werden. Der Bereich *Planung* (Prioritätsklasse 2) enthält Eigenschaften mit erhöhtem Risiko und mittlerer Vernetzung. Hier ist eine Integration in die nächste Produktgeneration anzustreben und je nach Änderungspotenzial zu priorisieren. Der Bereich *Monitoring* (Prioritätsklasse 3) vereint hochgradig vernetzte Eigenschaften mit hohem Variationsrisiko. Änderungen in diesem Bereich bedürfen langfristiger Planung und kontinuierlicher Beobachtung. Als dynamisch klassifizierte Eigenschaften sollten nach Möglichkeit durch geeignete Modularisierung flexibel realisiert werden. Für die Risikodimension wird die Skala des SGE-Risikoportfolios verwendet. Die Bestimmung der Schwellenwerte für den Vernetzungsgrad erfolgt relativ zum systemabhängigen Mittel- und Maximalwert, wobei die überproportionale Zunahme des Entwicklungsaufwands mit steigender Komplexität berücksichtigt wird. Aufgrund

der Einzigartigkeit und Individualität eines jeden Produktentwicklungsprozesses [ALB10] werden Übergangsbereiche zwischen den Prioritätsklassen definiert. Diese erlauben eine kontext-abhängige Zuordnung einzelner Eigenschaften, insbesondere bei mittleren Risikostufen oder moderatem Vernetzungsgrad. Die resultierende grafische Visualisierung unterstützt die systematische Priorisierung von Entwicklungsaktivitäten unter Berücksichtigung dynamischer und statischer Eigenschaften sowie deren Einfluss auf die Produktstruktur.

4.2 Anwendung der weiterentwickelten Systematik

Zur Validierung der erweiterten Systematik wurde deren Anwendung anhand zweier exemplarischer Anwendungsfälle durchgeführt. Zum einen mit einer Fallstudie zu einer Kaffeemaschine (4.2.1) und zum anderen mittels einer Implementierung im Rahmen des SFB 1608 <Convide> (4.2.2).

4.2.1 Anwendung der weiterentwickelten Systematik anhand der Fallstudie Kaffeemaschine

Für die Fallstudie *Kaffeemaschine* bildeten die Ergebnisse aus KUEBLER ET AL. [KSS+23] die Datengrundlage hinsichtlich der Dimensionen *Änderungspotential* und *Risiko bei Variation*. Ziel der Anwendung war es, die Anwendbarkeit, Aussagekraft und Visualisierbarkeit des Vernetzungsgrads zu prüfen. Insgesamt wurden 15 Produkteigenschaften identifiziert und entlang der drei Bewertungsdimensionen analysiert. Die Bewertung erfolgte durch eine interdisziplinäre Expertengruppe mit Erfahrung in Produktentwicklung und Systems Engineering. Zur Bestimmung des Vernetzungsgrads erarbeiteten die Teilnehmenden unabhängig voneinander das Systembild und leiteten daraus die Bewertungsmatrizen zwischen den Ebenen ab. Die Ergebnisse wurden anschließend gemeinsam diskutiert, konsolidiert und vereinheitlicht. Daraufhin erfolgte die automatisierte Berechnung des Vernetzungsgrads mittels eines Python-Skripts. Die resultierenden Werte wurden grafisch visualisiert und die Produkteigenschaften den drei Prioritätsbereichen zugeordnet (siehe Bild 5). Dabei zeigte sich, dass die Eigenschaft *Mahlvorgang* in den Umsetzungsbereich fällt, während der Großteil der Eigenschaften dem Monitoringbereich zugeordnet wurde. Die Einführung von Übergangsbereichen ermöglichte eine differenzierte Interpretation der Ergebnisse, wodurch die dynamische Eigenschaft *Milchaufschäumung* als Upgrade-Umsetzung priorisiert werden kann.

Die resultierende Visualisierung erwies sich insbesondere bei dynamischen Eigenschaften als wertvoll, da sie eine differenzierte Priorisierung auf Basis des potenziellen Entwicklungsaufwands erlaubt. Auch bei statischen Eigenschaften liefert der Vernetzungsgrad wichtige Hinweise zur strukturellen Einbindung, wodurch Rückschlüsse auf Modularisierungspotenziale gezogen werden können. Die Ergebnisse der Fallstudie bestätigten sowohl die Plausibilität der Bewertungslogik als auch die praktische Anwendbarkeit der Methodik. Infolgedessen wurde die Systematik zur Anwendung im Sonderforschungsbereich 1608 <Convide> freigegeben.

4.2.2 Anwendung der weiterentwickelten Systematik im Sonderforschungsbereich 1608 <Convide>

Im Rahmen des SFB 1608 <Convide> wurde die Systematik durch einen interdisziplinären Workshop auf ein cyber-physisches Bremssystem angewendet. Die Teilnehmenden des Workshops waren Forschende des SFB mit Expertise in Bremssystemen als auch im Systems Engineering. Im Gegensatz zur Kaffeemaschine lagen für das Bremssystem keine vorgefertigten, Vorausschau-basierten Ergebnisse vor, sodass zunächst die Eigenschaften, Funktionen und Teilsysteme für zwei aufeinanderfolgende Produktgenerationen systematisch erarbeitet werden mussten. Grundlage hierfür bildete ein Expertenworkshop, welcher dem Vorgehensmodell der Systematik folgte und vollständige Referenzmodelle für zwei Generationen lieferte. Die resultierenden Modelle integrieren die Eigenschafts-, Funktions- sowie physische Ebene und ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtung der Produktstruktur. Die Unterschiede der beiden Generationen wurden im Anschluss zur Aggregation von statischen und dynamischen Eigenschaften verwendet. Die aggregierten Daten wurden zur Bewertung der Vernetzung und des Risikos bei Variation in Templates überführt, bewertet und durch die Teilnehmenden diskutiert. Die zugehörigen Ergebnisse im Beschreibungsmodell sind in Bild 5 dargestellt.

Insgesamt wurden 19 relevante Produkteigenschaften identifiziert und klassifiziert. Die Ergebnisse konnten durch ingenieurwissenschaftliche Einschätzung validiert werden. So lässt sich verifizieren, dass Eigenschaften mit hohem Vernetzungsgrad (bspw. Regelbarkeit) oder hohem Entwicklungsrisiko (bspw. Wirkprinzip) mit einem langfristigen Planungshorizont verbunden sind. Die Rückmeldung der Teilnehmenden bestätigte den Nutzen der Systematik für die generationsübergreifende Produktentwicklung. Ein Vorteil der Implementierungsumgebung lag in der Verfügbarkeit mehrerer realer Systemgenerationen, was ein simulationsbasiertes Vergleichsszenario ermöglichte. Exemplarisch wird dies an der Eigenschaft Rekuperation verdeutlicht: Während die Eigenschaft in der ersten Generation noch nicht implementiert war, sollte sie in der zweiten eingeführt werden.

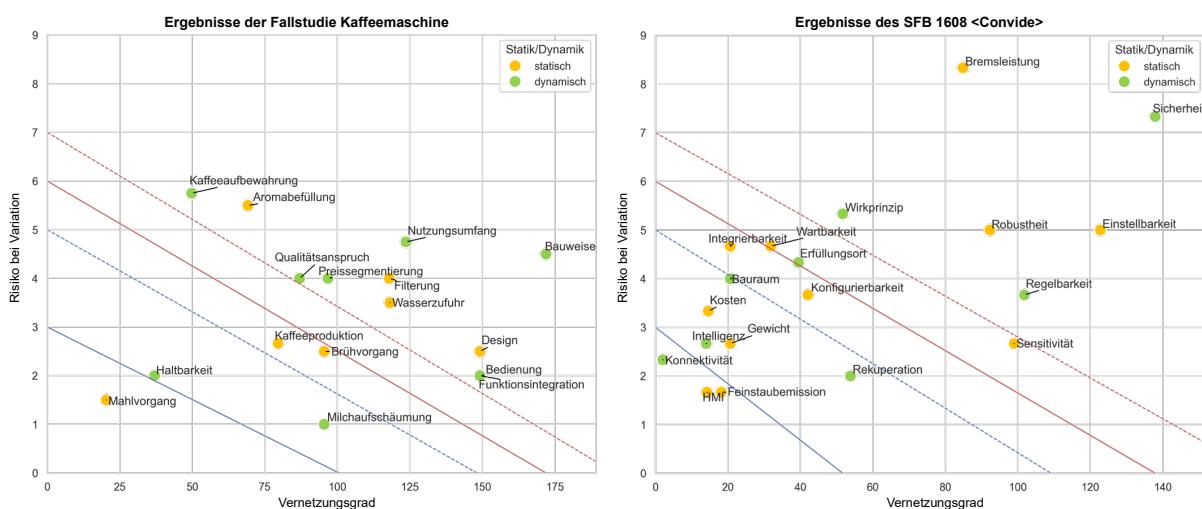


Bild 5: Ergebnisse der experimentellen Studie (Kaffeemaschine, links) und der Implementierungsstudie (Bremssystem, rechts)

Die vorliegende Analyse verdeutlicht, dass die erweiterte Systematik in der Lage ist, auf Basis des Vernetzungsgrads und des geschätzten Entwicklungsrisikos fundierte Aussagen über geeignete Entwicklungshorizonte zu treffen. Die erfolgreiche Anwendung auf das Bremssystem belegt damit die Übertragbarkeit, Anwendbarkeit und Aussagekraft des Verfahrens über die ursprünglich experimentelle Umgebung hinaus.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur gezielten Planung und Umsetzung von Upgrades in der Produktentwicklung wurde die bestehende Systematik nach KUEBLER ET AL. [KSS+23, KTS+23, KTT+24] methodisch weiterentwickelt. Ziel dieser Weiterentwicklung war es, auf Grundlage einer systematischen Analyse des Systems eine priorisierte Ableitung erforderlicher Entwicklungsaktivitäten zu ermöglichen. Hierzu wurde die Komplexitätszahl nach SINHA & DE WECK [SD13] invers interpretiert: Anstatt die Komplexität des Gesamtsystems zu beschreiben, dient sie nun der quantitativen Ermittlung des spezifischen Einflusses einzelner Produkteigenschaften auf die Systemkomplexität. Diese Adaption erlaubt es, mit der Modellierung des Referenzmodells den Vernetzungsgrad einzelner Produkteigenschaften zu bestimmen und so die potenzielle Aufwandswirkung von Änderungen einzelner Eigenschaften zukünftiger Produktgenerationen zu quantifizieren. In Kombination mit den Größen Entwicklungsrisiko und Änderungspotenzial ermöglicht dies eine differenzierte Priorisierung anstehender Entwicklungsaktivitäten.

Die Validierung des Ansatzes erfolgte anhand zweier Fallstudien: einer exemplarischen Anwendung an einer Kaffeemaschine sowie im Kontext des Sonderforschungsbereichs SFB 1608 <Convide>. Dabei wurde das in vorangegangenen Arbeiten entwickelte Vorgehensmodell mit den neuen Erkenntnissen aus der beschriebenen Weiterentwicklung verknüpft. Die Evaluation zeigt, dass die erweiterte Systematik grundsätzlich geeignet ist, Upgrade-Entwicklungsaktivitäten systematisch zu planen. Das zugrunde liegende Beschreibungsmodell liefert dabei nachvollziehbare, differenzierte und für die Praxis anschlussfähige Ergebnisse. Allerdings basiert die empirische Einschätzung bislang auf lediglich zwei wissenschaftlich kontrollierten Anwendungsfällen. Für eine weitergehende Validierung und zur Überprüfung der Generalisierbarkeit ist eine Anwendung in der industriellen Entwicklungspraxis erforderlich. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse könnten die bisherigen Ergebnisse untermauern und zur Weiterentwicklung der Methodik beitragen.

Zur Unterstützung der Implementierung von Upgrades im Produktlebenszyklus erscheint die Integration geeigneter Monitoring-Ansätze in zukünftiger Forschung vielversprechend. Ein möglicher Ansatz ist dabei die Systematik nach THÜMMEL ET AL. [TSS+], welche eine kontinuierliche Überwachung sich verändernder Umfeldeinflüsse vorsieht. Darüber hinaus sollte untersucht werden, inwieweit sich veränderte Produkteigenschaften unabhängig vom Gesamtsystem validieren lassen, um den Aufwand für nachträgliche Systemintegrationen zu minimieren und Upgrades effizient umsetzen zu können.

Förderhinweis

Dieser Beitrag wurde durch Forschung im Kontext der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) – SFB 1608 – 501798263 ermöglicht.

Literatur

[ABW15] ALBERS, A.; BURSAC, N.; WINTERGERST, E.: Produktgenerationsentwicklung - Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In: Binz, H.; Bertsche, B.; Bauer, W.; Roth, D. (Hrsg.): Beiträge zum 3. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung (SSP). Stuttgart, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2015

[ADK+23] ALBERS, A.; DÜSER, T.; KUEBLER, M.; SCHWARZ, S. E.; LICKEFETT, M. S.; PFAFF, F.; THÜMEL, C.: Upgradeable Mechatronic Systems - Definition and Model of Upgrades in the Context of the Model of SGE - System Generation Engineering. In: FISITA (Hrsg.): Proceedings of the FISITA 2023 World Congress. Bishop's Stortford, 2023

[AFH+20] ALBERS, A.; FAHL, J.; HIRSCHTER, T.; HAAG, S.; HUNEMEYER, S.; STAIGER, T.: Defining, Formulating and Modeling Product Functions in the Early Phase in the Model of PGE — Product Generation Engineering. IEEE ISSE 2020. 6th IEEE International Symposium on Systems Engineering: virtual symposium, October 12-November 12, 2020, 2020

[AG12] ALBERS, A.; GAUSEMEIER, J.: Von der fachdisziplinorientierten Produktentwicklung zur Vorausschauenden und Systemorientierten Produktentstehung. In: Anderl, R.; Eigner, M.; Sendler, U.; Stark, R. (Hrsg.): Smart Engineering – Interdisziplinäre Produktentstehung. acatech Diskussion, Springer, Berlin, 2012, S. 17–30

[AHF+20] ALBERS, A.; HIRSCHTER, T.; FAHL, J.; WÖHRLE, G.; REINEMANN, J.; RAPP, S.: Generic Reference Product Model for specifying complex products by the example of the automotive industry. Proceedings of TMCE, 2020, S. 353–370

[ALB10] ALBERS, A.: Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In: Horváth, I.; Mandorli, F.; Rusák, Z. (Eds.): Tools and methods of competitive engineering – Proceedings of the Eighth International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering - TMCE 2010, April 12 - 16, Ancona, Italy. 8th International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering (TMCE), Delft University of Technology, Delft, 2010, o.S.

[AR22] ALBERS, A.; RAPP, S.: Model of SGE: System Generation Engineering as Basis for Structured Planning and Management of Development. In: Krause, D.; Heyden, E. (Hrsg.): Design Methodology for Future Products – Data Drive, Agile and Flexible. Springer International Publishing, Cham, Schweiz, 2022, S. 27–46

[ARB17] ALBERS, A.; RAPP, S.; BURSAC, N.: Die Frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung. In: Binz, H.; Bertsche, B.; Bauer, W.; Roth, D. (Hrsg.): Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017 – Produktentwicklung im disruptiven Umfeld, Stuttgart, Deutschland, 28-29 Juni 2017. Beiträge zum Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, Fraunhofer Verlag, 2017, S. 345–354

[AWR+15] AZIZ, N.; WAHAB, D.; RAMLI, R.; AZHARI, C. H.: Modelling and optimisation of upgradability in the design of multiple life cycle products: a critical review. Journal of Cleaner Production, 112, 2015, S. 282–290

[BC09] BLESSING, L.; CHAKRABARTI, A.: DRM, a Design Research Methodology. Springer London, London, 2009

[BES+12] BARTELS, B.; ERMEL, U.; SANDBORN, P.; PECHT, M. G.: Strategies to the prediction, mitigation and management of product obsolescence. Wiley, Hoboken, N.J., 2012

[BWH+14] BAKKER, C.; WANG, F.; HUISMAN, J.; HOLLANDER, M. DEN: Products that go round: exploring product life extension through design. Journal of Cleaner Production, (69), 2014, S. 10–16

[DOR02] DORI, D.: Object-Process Methodology. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2002

[EBR17] ENGEL, A.; BROWNING, T. R.; REICH, Y.: Designing Products for Adaptability: Insights from Four Industrial Cases. *Decision Sciences*, (48)5, 2017, S. 875–917

[EM17] EHRENSPIEL, K.; MEERKAMM, H.: *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 6. Auflage, Hanser, München, 2017

[FS05] FRICKE, E.; SCHULZ, A. P.: Design for changeability (DfC): Principles to enable changes in systems throughout their entire lifecycle. In: INCOSE (Hrsg.): *Systems Engineering*. (Vol. 8, Issue 4), Wiley Online Library, 2005, S. 342–359

[FS16] FINK, A.; SIEBE, A.: *Szenario-Management – Von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrosten Entscheidungen*. Campus Verlag, Frankfurt, 2016

[GDE+19] GAUSEMEIER, J.; DUMITRESCU, R.; ECHTERFELD, J.; PFÄNDER, T.; STEFFEN, D.; THIELEMANN, F.: *Innovationen für die Märkte von morgen: Strategische Planung von Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen*. Hanser, München, 2019

[KK13] KLEINER, S.; KRAMER, C.: Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6. In: Abramovici, M.; Stark, R. (Hrsg.): *Smart Product Engineering – Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference*. CIRP Design Conference, Bochum, 2013, S. 93–102

[KSS+23] KUEBLER, M.; SCHUSTER, W.; SCHWARZ, S. E.; BRAUMANDL, A.; SIEBE, A.; ALBERS, A.: Upgradeable Mechatronic Systems - An Approach to determine changing Product Properties using Foresight. In: Liu, A.; Sami, K. (Hrsg.): *The 33rd CIRP Design Conference*. Procedia CIRP, Band 119, Science Direct, 2023, S. 78–83

[KTS+23] KUEBLER, M.; THÜMMEL, C.; SPEKKER, M. W.; SIEBE, A.; ALBERS, A.: Weiterentwicklung und Evaluation einer Systematik zur Bestimmung sich ändernder Produkteigenschaften. In: Dumitrescu, R.; Hölzle, K. (Hrsg.): *17. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung. Vorausschau und Technologieplanung*, Band 413, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2023, S. 301–318

[KTT+24] KUEBLER, M.; TAGHAVIAN, K.; TEUFEL, F.; SIEBE, A.; ALBERS, A.: Upgradeable Mechatronic Systems - Roadmapping for changing Product Properties. *Proceedings of the XXXV ISPIM Innovation Conference*, Tallinn, Estland, 2024, o.S.

[KW19] KHAN, M. A.; WUEST, T.: Upgradable Product-Service Systems: Implications for Business Model Components. *Procedia CIRP*, (80), 2019, S. 768–773

[LZ00] LENK, T.; ZELEWSKI, S.: *ECOVIN – Enhancing competitiveness in small and medium enterprises via innovation: Handbuch zum Innovationsmanagement in kleinen und mittleren Unternehmen*, 2000

[MAR21] MARTHALER, F.: Zukunftsorientierte Produktentwicklung - Eine Systematik zur Ableitung von generationsübergreifenden Zielsystemen zukünftiger Produktgenerationen durch strategische Vorausschau. Dissertation. In: Albers, A.; Matthiesen, S. (Hrsg.): *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung – Systeme - Methoden - Prozesse*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2021

[MÖR04] MÖRTL, M. A.: “DESIGN FOR UPGRADING” OF MACHINES AND PRODUCTION PROCESSES: A GUIDELINE BASED ON ACTUAL DEMANDS OF INDUSTRY AND SUSTAINABLE DESIGN. In: Folkeson, A. (Hrsg.): *Research for practice - innovation in products, processes and organisations – ICED 03*, 14th International Conference on Engineering Design ; 19 - 21 August 2003, The Royal Institute of Technology, Stockholm. ICED - International Conference on Engineering Design, Design Society, Glasgow, 2004, o.S.

[MX16] MARTINEZ, M.; XUE, D.: Development of Adaptable Products Based on Modular Design and Optimization Methods. *Procedia CIRP*, (50), 2016, S. 70–75

[SD13] SINHA, K.; DE WECK, O. L.: A network-based structural complexity metric for engineered complex systems. *Proceedings of the IEEE Systems Conference (SysCon)*, 2013, S. 426–430

[SFA12] SIEBE, A.; FINK, A.; ALBERS, A.: Using Scenarios for Product Development – Overview and Experiences. In: Horváth, I.; Albers, A.; Behrendt, M. (Hrsg.): *Proceedings of TMCE 2012. 07.-11.05.2012*, Karlsruhe, 2012

[SGS+22] SCHUH, G.; GÜTZLAFF, A.; SCHLOSSER, T. X.; WELSING, M.; BALGAR, L.: How to measure ecological sustainability in manufacturing? -A literature review of indicator frequency and relevance, 2022

[SKK+23] SCHUH, G.; KUHN, M.; KEUPER, A.; PATZWALD, M.; SCHENK, L.; GUO, D.; FEUCHT, M.; KANTELBERG, J.; ROSSMAIR, G.; SCHROTH, H.; VIETHEN, U.; ZELLER, P.; unav: New Modularity and Technology Roadmapping. In: Schmitt, R. H.; Bergs, T.; Brecher, C.; Schuh, G. (Eds.): Empower Green Production. Conference proceedings – AWK '23, May 11-12, 2023, 2023

[SWC00] STONE, R. B.; WOOD, K. L.; CRAWFORD, R. H.: A heuristic method for identifying modules for product architectures. *Design Studies*, (21)1, 2000, S. 5–31

[TSS+] THÜMMEL, C.; SCHMIDT, T.; SIEBE, A.; ALBERS, A.: A Systematic Approach for Continuous Monitoring and Validation of Product Properties in the Product Engineering Process. Proceedings of the 31st ICE IEEE/ITMC Conference on Engineering, Technology, and Innovation ICE, (2025)

[WEY88] WEYUKER, E. J.: Evaluating software complexity measures. *IEEE Transactions on Software Engineering*, (14)9, 1988, S. 1357–1365

Autoren

Maximilian Kuebler hat einen Masterabschluss im Fach Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erlangt. Seit 2021 arbeitet er als Referent der Institutsleitung beim IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT. Parallel forscht er als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand in der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik und -management. Sein Forschungsschwerpunkt liegt im Innovationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und strategischer Vorausschau. Dabei adressiert er die generationsübergreifende Planung von Produkten sowie ihrer Teilsysteme mit einem Fokus auf Upgrades.

Maximilian Bräuner absolvierte sein Bachelorstudium (2022) und sein Masterstudium (2025) in Wirtschaftsingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Seine Masterthesis verfasste er am Institut für Produktentwicklung (IPEK) bei Prof. Dr.-Ing. Albert Albers und M. Sc. Maximilian Kühler. Thematisch befasste er sich mit einer Methodik zur zukunftsrobusten Produktentwicklung. Seit 2025 ist Maximilian Bräuner als Projektmanager bei OPTIMA consumer GmbH im Sondermaschinenbau tätig und verantwortet dort die Leitung und Koordination von Maschinenprojekten.

Carsten Thümmel schloss 2018 seinen Bachelor in Maschinenbau ab und erhielt 2021 seinen Master am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Er ist Doktorand und Gruppenleiter in der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik und -management am IPEK - Institut für Product Engineering des KIT. Seine Forschungsinteressen umfassen Vorausschau, Produktplanung und Monitoring für das Innovationsmanagement und die Produktentwicklung in Kombination mit strategischer Vorausschau.

Prof. Dr.-Ing. Andreas Siebe ist Honorarprofessor am IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT und lehrt "Strategische Produktentwicklung - Identifikation von Potenzialen für innovative Produkte". Er studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Paderborn und promovierte am Heinz Nixdorf Institut in Paderborn im Fachbereich Maschinenbau. Danach war er Mitbegründer und bis 2019 Mitglied des Vorstandes eines Beratungsunternehmens, das sich mit der Entwicklung von Szenarien beschäftigt. Seine Schwerpunkte sind Szenarioplanung, vorausschauende Produktentwicklung und die Implementierung zukünftiger Kundenbedürfnisse

in Produktentwicklungsprozesse. Er hat mehrere Bücher und (wissenschaftliche) Publikationen in internationalen Fachzeitschriften veröffentlicht. Zu seinen Forschungsinteressen gehört die Kombination von Zukunftsmethoden mit Methoden der Produktentwicklung, insbesondere in den frühen Phasen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Düser ist seit Oktober 2022 Institutsleiter am IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Nach seinem Studium am Karlsruhe Institut für Technologie und anschließender Promotion am IPEK - Institut für Produktentwicklung hatte Tobias Düser innerhalb der AVL Gruppe verschiedene Positionen im Bereich innovativer Entwicklungs- und Validierungsmethoden inne. Dabei arbeitete er insbesondere an neuartigen Automatisierungs- und Simulationslösungen für Prüfstände. U. a. war er beteiligt am Aufbau eines neuen Geschäftsbereiches, des Produktpportfolios und Partnernetzwerkes im Bereich Advanced Driver Assistant Systemen sowie für das Automatisierte Fahren. Er war Mitglied des globalen Führungskreises ADAS/AD und auch intensiv an der globalen Strategieentwicklung beteiligt. Ab 2015 war er verantwortlich für das Advanced Solution Lab bei AVL und Leiter des Standortes Karlsruhe. 2020 übernahm er zusätzlich die globale Verantwortung für den Bereich ADAS/AD Virtual Testing Solutions. Tobias Düser und sein Team arbeiteten an virtuellen und XIL-basierten Validierungsmethoden für das Absichern und Testen von Advanced Driver Assistant Systemen sowie für das Automatisierte Fahren. Darüber hinaus wirkt er in verschiedenen Arbeitsgruppen wie z. B. der IAMTS oder der UNECE mit.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, Jahrgang 1957, ist seit 1996 Ordinarius und heute Sprecher der Institutsleitung des IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Er promovierte 1987 bei Prof. Paland am Institut für Maschinenelemente, Konstruktionstechnik und Sicherheitstechnik der Universität Hannover. Vor seinem Ruf nach Karlsruhe war Prof. Albers tätig bei der LuK GmbH & Co. OHG, zuletzt als Entwicklungsleiter sowie stellvertretendes Mitglied der Geschäftsleitung. Er ist Gründungs- und ehemaliges Vorstandsmitglied der wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP und Mitglied der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech). Zwischen 2008 und 2024 war er Präsident des Allgemeinen Fakultätentages (AFT e. V.). Darüber hinaus engagiert er sich im Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und ist in Beiräten mehrerer Unternehmen tätig. Im Jahre 2016 wurde ihm und dem IPEK-Team der Honorary Award der Schaeffler FAG Stiftung für exzellente Leistungen und Kompetenzen in Wissenschaft, Forschung und Lehre auf technisch-wissenschaftlichem Gebiet verliehen.

Ein methodisches Framework zur kombinierten Bewertung technologischer und marktwirtschaftlicher Reife

***Katharina Kleine¹, Prof. Dr. -Ing. Alexander Schönmann¹,
Prof. Dr. Jan Oliver Schwarz¹***

¹ *Bayerisches Foresight-Institut, Technische Hochschule Ingolstadt,
katharina.kleine@thi.de, alexander.schoenmann@thi.de, janoliver.schwarz@thi.de*

Zusammenfassung

Die Bewertung und Einordnung neuer Technologien entlang ihres Reifegrads ist ein zentrales Element im Innovationsmanagement sowie der strategischen Planung neuer Technologien. Für den kommerziellen Erfolg eines zukünftigen Produkts gilt es allerdings auch die Kommerzialisierungsreife zu berücksichtigen. Während sich das Technology Readiness Level (TRL) zur Bewertung der technischen Machbarkeit als auch für die Erfolgsverfolgung in Entwicklungsprojekten bereits in Forschung und Industrie etabliert hat, bleibt die systematische Erfassung der Marktreife meist fragmentiert oder erfahrungsbasiert. In diesem Beitrag wird ein konzeptionelles Bewertungsframework entwickelt, das TRL-Bewertung und Market-Readiness-Bewertung (MRL) in einer zweidimensionalen Matrix kombiniert. Ziel ist es, eine differenzierte und dennoch anwendungsnahe Einordnung technologischer Innovationen zu ermöglichen, um Investitions-, Entwicklungs- sowie Markteintrittsentscheidungen systematisch zu unterstützen. Grundlage des Frameworks bildet eine strukturierte MRL-Systematik mit sieben Bewertungsdimensionen, abgeleitet aus dem Stand der Forschung – von Bedarfsspezifikation über Value Proposition bis zu regulatorischen und gesellschaftlichen Faktoren. Die konzeptionelle Skala wird um einen strukturierten Fragebogen ergänzt, um eine systematische und transparente Bewertung des RLs zu ermöglichen. Die entstehende Matrix aus TRL und MRL erlaubt es, den aktuellen Entwicklungsstand einer Technologie zu visualisieren und konkrete strategische Handlungspfade aufzuzeigen. Zur Veranschaulichung wird das Framework exemplarisch auf ein Technologiebeispiel aus dem Bereich der Neurotechnologie (BCI) angewendet. Der Beitrag versteht sich als methodischer Impuls zur Weiterentwicklung etablierter Reifegradsmodelle und bietet ein praxisnahe Instrument zur Bewertung von Zukunftstechnologien – sowohl für Foresight-Anwendungen als auch für Innovationsentscheidungen in Unternehmen, Forschung oder Politik.

Schlüsselworte

Technologiebewertung, Marktbewertung, Technologiereife

A Methodological Framework for the Combined Assessment of Technological and Market Readiness

Abstract

Evaluating and classifying new technologies according to their maturity is a central element in innovation management and the strategic planning of emerging technologies. However, for the commercial success of future products, it is equally crucial to consider their commercialization readiness. While the Technology Readiness Level (TRL) for assessing technical feasibility and tracking development progress is well-established both in research and industry, systematic evaluation of market readiness (Market Readiness Level, MRL) often remains fragmented or experience-based. This paper develops a conceptual assessment framework that combines TRL evaluation and MRL assessment within a two-dimensional matrix. Its goal is to enable a differentiated yet practical classification of technological innovations, thus systematically supporting investment, development, and market-entry decisions. The foundation of the framework is a structured MRL methodology, incorporating seven assessment dimensions derived from the state of research – ranging from needs specification and value proposition to regulatory and societal factors. This conceptual scale is supplemented by a structured questionnaire, facilitating a systematic and transparent evaluation of readiness levels. The resulting TRL-MRL matrix allows visualization of the current development status of a technology and outlines concrete strategic pathways. To illustrate its application, the framework is demonstrated using an example from Neurotechnology (BCI). This paper is intended as a methodological impulse for further development of established maturity models and offers a practical tool for assessing future technologies – applicable in foresight processes as well as innovation decisions within businesses, research institutions, and policymaking bodies.

Keywords

Technology Assessment, Market Assessment, Technology Readiness

1 Motivation und Einführung

In einer Welt, die sich rasant verändert, bestimmen technologische Innovationen zunehmend über die Wettbewerbsfähigkeit und Zukunftsfähigkeit von Unternehmen. Visionäre Technologien wie Brain-Computer-Interfaces (BCIs) versprechen nicht nur technologische Sprünge, sondern wecken auch die Fantasie von Industrie, Wissenschaft und Gesellschaft gleichermaßen. Doch gerade derartige Technologien, die an der Schnittstelle zwischen technischer Machbarkeit und gesellschaftlicher Akzeptanz stehen, stellen Unternehmen vor große Herausforderungen. Es genügt längst nicht mehr, nur technologische Reife nachzuweisen – Erfolg entscheidet sich erst im Zusammenspiel aus Innovationspotenzial, Marktfähigkeit und sozialer Akzeptanz. Während das Technology Readiness Level (TRL) zur Bewertung der technischen Machbarkeit bereits ein integraler Bestandteil industrieller Innovationsprozesse ist, bleibt die systematische Erfassung der Marktreife meist fragmentiert. Insbesondere dort, wo technische Durchbrüche auf gesellschaftliche und regulatorische Realitäten treffen, fehlt bislang ein vergleichbar fundiertes und integratives Bewertungsinstrument.

Vor diesem Hintergrund stellt der vorliegende Beitrag ein innovatives, methodisches Framework zur kombinierten Bewertung technologischer und marktwirtschaftlicher Reife vor. Das *TAMARA – Technology And Market Acceptance Readiness Assessment* – Framework verbindet das in der Industrie etablierte TRL-Schema [RS10] mit einem neu entwickelten Market Readiness Level (MRL)-Assessment. Der hierin liegende Beitrag ist die Entwicklung eines MRL Bewertungsschemas, welches auf etablierter Theorien wie dem Technology Acceptance Model (TAM) [Dav89], der Diffusion of Innovations Theory (DIT) [Rog83], und dem Technology-Organization-Environment Framework (TOE) [TF90] basiert und somit eine holistische Perspektive ermöglicht.

Das Ziel dieses integrativen Ansatzes ist es, Entscheidern in Industrie und Forschung ein klares und praktikables Werkzeug an die Hand zu geben, mit dem der Entwicklungsstand und die strategische Positionierung von Zukunftstechnologien übersichtlich beurteilt werden können. Kernstück ist eine visuell klare Matrixdarstellung, die den TRL und MRL auf zwei Achsen abbildet. Darin wird jede Technologie als Bewertungsobjekt dargestellt, dessen Position und Größe die strategische Positionierung und den Investitionsbedarf auf einen Blick verdeutlichen. Im Folgenden wird das Framework zunächst theoretisch fundiert und seine methodische Operationalisierung detailliert beschrieben. Anschließend wird dessen praktische Anwendung am Beispiel eines Brain-Computer-Interfaces demonstriert. Abschließend werden die Stärken, Limitationen sowie Perspektiven für die Weiterentwicklung diskutiert.

2 Betrachtungsrahmen theoretischer Modelle

Die Analyse der technologischen Akzeptanz und der Markteinführung neuer Technologien ist seit mehreren Jahrzehnten Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Forschung. Insbesondere die Frage, wie neue Technologien erfolgreich am Markt eingeführt und von Nutzer*innen sowie Organisationen akzeptiert werden, bildet einen zentralen Forschungsschwerpunkt. Vor diesem Hintergrund sind eine Vielzahl theoretischer Modelle und empirischer Ansätze entstanden, die

unterschiedliche Facetten technologischer und marktseitiger Reife abbilden. Der Stand der Forschung wird im Folgenden in drei Bereiche gegliedert: Modelle zur Bestimmung der technologischen Reife, Modelle zur Technologieakzeptanz und -adoption sowie Ansätze der Kombination beider Dimensionen in bestehenden Arbeiten.

2.1 Modelle zur Bestimmung technologischer Reife

Zur Bewertung des Entwicklungsstands einer Technologie existiert eine Vielzahl an Ansätzen, die sich hinsichtlich ihrer Methodik und ihres Fokus unterscheiden. Für eine systematische Einordnung lassen sich diese in drei grundlegende Segmente [DSM+24] einteilen (siehe zusammenfassend Tabelle 1):

- lebenszyklusbasierte Modelle,
- informetrische Analysen und
- Reifegradstufenmodelle.

Tabelle 1: Ansätze zur Reifebestimmung (eigene Darstellung in Anlehnung an [DSM+24])

Merkmale	(Lebens-)Zyklusmodelle	Informetrische Analysen	Reifegradstufenmodelle (TRL)
Grundidee	Qualitative Beschreibung der zeitlichen Entwicklungs dynamik in Phasen (z.B. S-Kurve).	Quantitative, datenbasierte Bestimmung der Reifephase durch Analyse von Publikationen und Patenten.	Bewertung des Fortschritts anhand eines standardisierten, stufenbasierten Kriterienkatalogs.
Datenbasis	Strategische Einschätzung basierend auf qualitativen Merkmalen und idealtypischen Verläufen.	Quantitative Daten aus wissenschaftlichen und Patent-Datenbanken; zunehmend auch Machine Learning.	Expertenbewertung basierend auf einem Kriterienkatalog zur Prüfung der Anforderungserfüllung pro Stufe.
Stärken	Gut für die strategische Langzeitplanung und Visualisierung von Technologiedynamiken.	Hohe Objektivität durch datenbasierte Grundlage; kann aufkommende Trends frühzeitig erkennen.	Weit verbreitet, standardisiert und einfach zu kommunizieren; gut für F&E-Controlling.
Schwächen	Oft zu abstrakt, empirisch schwer nachweisbar.	Komplex in der Anwendung, erfordert hohe "Data Literacy".	Rein technischer Fokus, vernachlässigt systematisch alle nicht-technischen Erfolgsfaktoren.
Relevanz für TAMARA	Liefert den strategischen Kontext für die Notwendigkeit einer Phasenbetrachtung.	Inspiriert zukünftige, KI-gestützte Weiterentwicklungen des Frameworks zur Objektivierung.	Bildet die direkte Grundlage für die TRL-Achse und die stufenbasierte Logik des MRL.

Im Folgenden werden diese Ansätze kurz vorgestellt, um das TRL-Konzept fundiert einzuordnen und dessen Limitationen für eine ganzheitliche Bewertung aufzuzeigen.

Zyklusbasierte und informetrische Ansätze: Nach [DSM+24] beschreiben (Lebens-) Zyklusmodelle die Entwicklungs dynamik einer Technologie qualitativ anhand idealtypischer Phasen wie Entstehung, Wachstum und Reife, oft visualisiert durch S-Kurven. Sie dienen primär der strategischen Langzeitbetrachtung. Einen quantitativeren Ansatz verfolgen informetrische

Analysen, die anhand von Publikations- oder Patentdaten versuchen, die Reifephase einer Technologie objektiv zu bestimmen. Während beide Ansätze wertvolle kontextuelle Einblicke bieten, könnte ihnen jedoch die standardisierte und anwendungsorientierte Struktur fehlen, die für ein operatives Bewertungsinstrument wie das *TAMARA*-Framework erforderlich ist. Diese wird durch Reifegradstufenmodelle bereitgestellt.

Reifegradstufenmodelle: Das TRL-Konzept: Der in der Praxis wohl etablierteste Ansatz zur Bewertung technologischer Reife ist das Technology Readiness Level (TRL). Ursprünglich entwickelt von der NASA [Man09], ist es heute in zahlreichen Branchen für die Kommunikation und Steuerung von F&E-Projekten verbreitet [DSM+24]. Das TRL beschreibt den Entwicklungsstand einer Technologie anhand eines neunstufigen Kriterienkatalogs, der den Weg von der Grundlagenforschung (TRL 1) bis zum erprobten System im Einsatz (TRL 9) abbildet. Beispielsweise würde ein funktionaler Laborprototyp für eine neue Batterie auf TRL 4 fallen, während ein in Flugtests erprobtes Triebwerk TRL 7–8 erreichen würde.

Für den industriellen Kontext wurde das Konzept speziell für Produktionstechnologien von [RS10] in eine praxistauglichere, siebenstufige Skala überführt. Trotz seiner weitreichenden Anwendung liegt die entscheidende Limitation des TRL in seinem alleinigen Fokus auf technische Kriterien. Aspekte wie Marktpotenzial, Nutzerakzeptanz oder regulatorische Rahmenbedingungen werden systematisch vernachlässigt, wodurch das TRL keine Aussage über den potenziellen wirtschaftlichen Erfolg einer Technologie treffen kann.

2.2 Modelle zur Technologieakzeptanz und -adoption

Im Gegensatz zum TRL konzentrieren sich Modelle der Technologieakzeptanz und -adoption primär auf die Nutzer- und Marktseite. Zu den bedeutendsten Modellen gehören hierbei die Diffusion of Innovations Theory (DIT) [Rog83], das Technology Acceptance Model (TAM) [Dav89], die Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) [VMD+03] sowie das Technology-Organization-Environment-Modell (TOE) [TF90].

Diffusion of Innovations Theory

Die Diffusion of Innovations Theory (DIT) postuliert, dass die Einführung neuer Technologien wesentlich von der Kompatibilität mit bestehenden Werten und Prozessen sowie dem wahrgenommenen relativen Vorteil der Innovation gegenüber bestehenden Lösungen abhängt [Rog83]. Dieses Modell wurde bereits erfolgreich auf die Einführung industrieller Innovationen, insbesondere im Kontext von Industrie 4.0, angewandt [MS20].

Technology Acceptance Model

Das Technology Acceptance Model (TAM) nach [Dav89] beschreibt insbesondere zwei zentrale Einflussgrößen für die Nutzerakzeptanz: die wahrgenommene Nützlichkeit und die wahrgenommene Bedienungsfreundlichkeit einer Technologie. TAM wurde umfassend empirisch validiert und in verschiedenen industriellen Kontexten eingesetzt, um die Akzeptanzfaktoren von Technologien wie Industrie 4.0 zu untersuchen [MS20].

Unified Theory of Acceptance and Use of Technology

Die Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) vereint mehrere frühere Modelle einschließlich des TAM und hebt vier zentrale Einflussfaktoren hervor: Leistungserwartung, Aufwandserwartung, sozialer Einfluss und förderliche Rahmenbedingungen [VMD+03]. Im industriellen Kontext wurde UTAUT erfolgreich zur Erklärung und Vorhersage des Nutzerverhaltens bei der Einführung neuer Technologien, insbesondere im Modell TAME (Technology Acceptance in a Manufacturing Environment), angewandt [HHS+24].

Technology-Organization-Environment Modell

Das Technology-Organization-Environment (TOE) Modell erweitert die Perspektive, indem es technologische, organisationale und umfeldbezogene Faktoren als wesentliche Einflussgrößen für die Adoption neuer Technologien benennt [GCS+20]. Es wurde bereits erfolgreich genutzt, um die Einführung digitaler Technologien in Fertigungsunternehmen zu analysieren [GC19].

Neben den klassischen Akzeptanzmodellen existieren spezifische Rahmenwerke, die insbesondere Adoptionsbarrieren und fördernde Faktoren in den Fokus rücken. Ein Beispiel hierfür ist das Commercial Adoption Readiness Assessment Tool (CARAT), das eine Ergänzung zum TRL darstellt und insbesondere die externen kommerziellen und gesellschaftlichen Risiken adressiert [TMC+23-ol]. Dieses Framework hat seine Stärke darin, gezielt kommerzielle Hürden wie Marktakzeptanz, Ressourcenverfügbarkeit und regulatorische Herausforderungen zu identifizieren, bleibt jedoch in der Betrachtung interner Implementierungsaspekte limitiert.

2.3 Bisherige Ansätze zur Kombination von Reifegradmodellen

Die Limitationen des eindimensionalen TRL-Ansatzes führten bereits zu weiterführender Entwicklung kombinierter Modelle, die als direkte konzeptionelle Vorbilder für das TAMARA-Framework dienen. Wesentliche Erkenntnisse wurden hierbei insbesondere aus der Arbeit von [Sch24] mit der Kopplung von TRL und einem Integration Readiness Level (IRL) und dem methodischen Bauplan für eine operationalisierbare, stufenbasierte Bewertung der zweiten Dimension entnommen. Das IRL misst in diesem Modell gezielt die unternehmensinterne, operative Reife und berücksichtigt Faktoren wie die prozessuale Integration in bestehende Abläufe, die technische Schnittstellenkompatibilität und die notwendige Mitarbeiterqualifikation.

Das *TAMARA*-Framework greift die fundamentalen Erkenntnisse dieses Ansatzes auf. Die Neuerung des hier vorgestellten Ansatzes liegt in der Entwicklung eines umfassenden Market Readiness Levels (MRL). Dies ermöglicht durch die systematische Einbindung der in Kapitel 2.2 diskutierten Akzeptanz- und Adoptions-Theorien eine holistische Bewertung der kommerziellen, nutzerseitigen und gesellschaftlichen Reife.

2.4 Limitationen der Modelle & Motivation für das *TAMARA*-Framework

Technologische Reifegradmodelle wie das TRL sind zwar unerlässlich für die Steuerung des F&E-Prozesses, induzieren jedoch eine rein technologiegetriebene Sichtweise. Eine Fokussierung allein auf den TRL birgt die Gefahr, technologisch „perfekte“ Produkte zu entwickeln, die

am Markt scheitern, weil sie keinen relevanten Bedarf decken oder auf unvorhergesehene regulatorische Hürden stoßen. Auf der anderen Seite adressieren Akzeptanz- und Adoptionsmodelle wie TAM oder UTAUT exakt diese Nutzer- und Marktfaktoren, vernachlässigen jedoch systematisch die technische Realisierbarkeit.

Darüber hinaus zeigt die aktuelle Forschungsliteratur, wie sie von [Sch24] zusammengefasst wird, weitere Lücken auf. Viele Studien konzentrieren sich auf die Adoptionsentscheidung selbst oder auf Post-Implementation-Analysen, bieten aber nur begrenzte Unterstützung für die kritische (Vor-)Implementierungsphase in Unternehmen. Zudem fehlt es oft an praxisnahen, handlungsorientierten Methoden für das Management; die Forschung beschränkt sich häufig auf die Identifikation von Barrieren, anstatt anwendbare Strategien abzuleiten [Sch24]. Ergänzend dazu ist der hohe Erhebungsaufwand für umfassende empirische Studien oft eine Hürde, die der Anwendung in der Praxis im Wege stehen könnte.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass eine reine Addition bestehender Modelle gegebenfalls nicht ausreicht. Erforderlich ist eine synthetisierende Betrachtung, die diese Lücken adressiert. Das hier vorgeschlagene *TAMARA*-Framework kombiniert das TRL mit einer durchdachten MRL-Einstufung und macht durch die Matrix-Visualisierung die Beziehung zwischen beiden Dimensionen sichtbar und damit strategisch manageable. Es entsteht somit ein umfassendes Werkzeug, das nicht nur den Entwicklungsfortschritt misst, sondern fundierte Entscheidungsgrundlagen für den gesamten Innovationsprozess liefert.

3 Methodisches Vorgehen & Konzept des TAMARA-Frameworks

Im nachfolgenden Abschnitt wird zunächst das methodische Vorgehen zur Entwicklung des *TAMARA*-Frameworks skizziert. Anschließend wird dessen finale Grundstruktur detailliert erläutert, um die Funktionsweise der Bewertungslogik und ihrer Komponenten transparent darzustellen.

Methodisches Vorgehen

Die Konzeption des Frameworks erfolgte in einem systematischen Prozess, der in Bild 1 visualisiert wird. Ausgehend von einer umfassenden Literaturrecherche (Kapitel 2) wurden zunächst etablierte theoretische Modelle ausgewählt, die als wissenschaftliches Fundament dienen. Eine kritische Analyse dieser Modelle deckte bestehende Lücken auf, insbesondere an der Schnittstelle von technischer und marktseitiger Reifebewertung. Auf dieser Basis wurden die Kernkomponenten des Frameworks – die integrierte TRL-MRL-Matrix, die MRL-Dimensionen und der dazugehörige Assessment-Fragebogen – iterativ entworfen und konzeptualisiert. Die praktische Anwendbarkeit und Aussagekraft des finalen Frameworks wurden abschließend durch eine exemplarische Anwendung evaluiert (Kapitel 5).

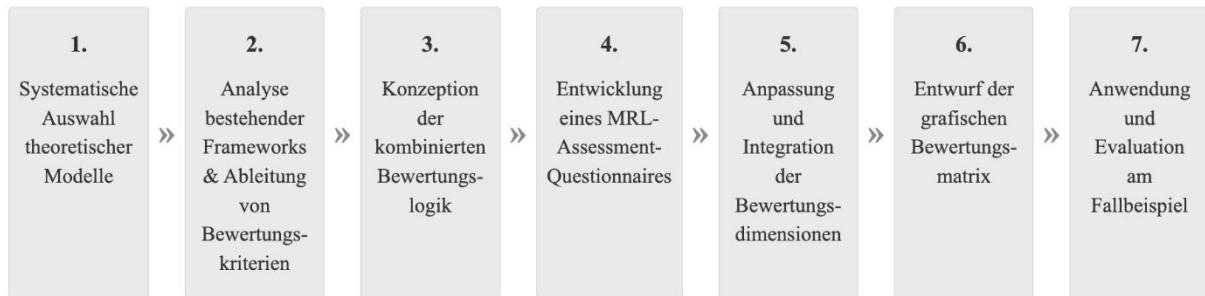


Bild 1: Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des TAMARA-Frameworks

Grundstruktur des Frameworks

Das TAMARA-Framework ist als zweidimensionale Bewertungsmatrix konzipiert (siehe Bild 2), die den technologischen Reifegrad (TRL) auf der vertikalen Achse und den Marktreifegrad (MRL) auf der horizontalen Achse abbildet. Jede zu bewertende Technologie wird darin als kreisförmiges Bewertungsobjekt positioniert. Dessen Position und Größe (als Indikator für das Investitionsvolumen) ermöglichen eine schnelle strategische Verortung.

Die Matrix ist in ein 3x3-Raster unterteilt, das sich aus einer niedrigen, mittleren und hohen Reife auf den beiden Achsen ergibt. Die wahre diagnostische Stärke dieser Darstellung liegt in der Identifikation von strategischen Ungleichgewichten zwischen Technik und Markt. Eine Positionierung im Feld oben links („Markt finden (Technology-Push)“) signalisiert beispielsweise eine technologisch ausgereifte Lösung, für die noch kein valider Markt gefunden wurde. Umgekehrt deutet eine Position unten rechts („Technologie beschleunigen (Market-Pull)“) auf einen klaren Marktbedarf hin, für den die Technologie noch nicht ausreichend entwickelt ist. Die Felder auf der Hauptdiagonalen repräsentieren einen ausgewogenen Entwicklungspfad von der „Grundlagenforschung“ bis zur „Skalierung & Kommerzialisierung“.

	Niedrig (MRL 1-3)	Mittel (MRL 4-5)	Hoch (MRL 6-7)
Hoch (TRL 6-7)	Markt finden (Technology-Push)	Validieren & Pilotieren	Skalieren & Kommerzialisieren
Mittel (TRL 4-5)	Inkubieren & Beobachten	Gezielt entwickeln	Anwendungsfall schärfen
Niedrig (TRL 1-3)	Grundlagenforschung	Partnerschaften prüfen	Technologie beschleunigen (Market-Pull)

Bild 2: Grundstruktur des TAMARA-Frameworks

Die Bestimmung des Technology Readiness Levels erfolgt nach etablierten, prinzipienbasierten Methoden, wie sie in der Systematik von [RS10] für Produktionstechnologien mit vordefinierten Kriterien für die jeweilige Stufe beschrieben sind. Diese Bewertung wird in der Regel in Expertenworkshops oder tiefreichenden Recherchen vorgenommen und stützt sich auf tangible Belege wie erfolgreich abgeschlossene Laborversuche, validierte Simulationsmodelle oder funktionale Demonstratoren im Einsatz.

Die Einordnung des Bewertungsgegenstands in das MRL, bestehend aus dem konzipierten Assessment, ist die wesentliche Neuerung und zugleich der zentrale Mehrwert dieses Beitrags. Dieses Assessment erfolgt mittels eines speziell konzipierten Fragebogens, der als Instrument zur Selbstbewertung für interdisziplinäre Projekt- oder Innovationsteams entwickelt wurde. Es senziell für eine umfassende Bewertung ist die Einbindung unterschiedlicher Perspektiven aus F&E, Produktmanagement, Marketing, Vertrieb sowie gegebenenfalls regulatorischen Abteilungen. Durch den kollaborativen Bewertungsprozess werden die einzelnen Funktionsbereiche zu einer gemeinsamen und ehrlichen Auseinandersetzung mit nicht-technischen Hürden motiviert. Die Struktur des Fragebogens, die theoretische Fundierung der Fragen sowie die detaillierte Scoring-Methodik werden ausführlich im folgenden Kapitel 4 erläutert.

4 Operationalisierung des MRL- Assessments

Die methodische Konzeption des MRL-Assessments folgt bewusst einer klaren Stage-Gate-Logik in Anlehnung an die etablierte TRL-Systematik, um eine hohe Anwendbarkeit und intuitive Verständlichkeit für Entscheidungsträger zu gewährleisten. Die Struktur des Fragebogens richtet sich an sieben aufeinander aufbauenden Stufen aus. Jede Stufe repräsentiert eine kritische Phase im Kommerzialisierungsprozess und wird durch spezifische Fragen operationalisiert, die auf den in Kapitel 2 vorgestellten, wissenschaftlich validierten Skalen basieren (Diffusion of Innovations Theory (DIT), des Technology Acceptance Models (TAM), der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT), des Technology-Organization-Environment Frameworks (TOE) sowie des Commercial Adoption Readiness Assessment Tools (CARAT)). Eine Technologie muss dabei die Kriterien einer Reifegradstufe mehrheitlich erfüllen, bevor sie die nächste Stufe erreicht.

Die sieben MRL-Stufen, bestehend aus jeweils in etwa fünf sorgfältig konstruierten Fragen (Tabelle 2 bildet einige dieser Fragen ab), zeichnen thematisch einen kumulativen und logisch aufeinander aufbauenden Prozess auf. Die initialen Stufen MRL 1 (Bedarfsspezifikation) und MRL 2 (Value Proposition) dienen der Validierung der fundamentalen Geschäftsidee, von der Identifikation eines Problems bis zur Formulierung eines konkreten Wertversprechens. Daran schließt die Phase der externen Validierung und praktischen Prüfung an: MRL 3 (Markterwartungen) gleicht die interne Planung mit dem Feedback von Schlüsselakteuren ab, während MRL 4 (Einbettungsfähigkeit) die praktische, technisch-prozessuale Integrationseignung in bestehende Systeme bewertet. Die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Skalierung werden anschließend in MRL 5 (Skalierbarkeit und Legitimität), das sich mit gesellschaftlicher Akzeptanz befasst, und MRL 6 (Rechtliche Rahmenbedingungen), das die formale "License to Operate" sicherstellt, geschaffen. Den Abschluss des Prozesses bildet MRL 7 (Domestizierung und

Bereitschaft zur Veränderung), das die finale, tiefgehende Adoption und nahtlose Etablierung der Technologie beim Endanwender thematisiert.

Die Beantwortung jeder Frage erfolgt auf einer 5-stufigen Likert-Skala (1 = Kriterien nicht erfüllt; 5 = Kriterien vollständig erfüllt). Zur Ermittlung des Reifegrads wird für jede der sieben MRL-Stufen der Medianwert aller zugehörigen Antworten berechnet. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass die ordinale Natur der Likert-Skala angemessen berücksichtigt wird. Eine Stufe gilt als erfolgreich bestanden, wenn der Medianwert mindestens 4 beträgt.

Zur Ergänzung der Medianbetrachtung kann die Shannon-Entropie berechnet werden, um den Grad der Übereinstimmung innerhalb der Bewertungsgruppe zu erfassen. Niedrige Entropiewerte deuten auf hohen Konsens hin (z. B. wenn die Mehrheit der Antworten auf „4“ oder „5“ liegt), während hohe Werte eine größere Streuung der Einschätzungen anzeigen. Dies liefert wertvolle Hinweise sowohl für die Interpretation der Ergebnisse als auch für die gezielte Weiterentwicklung des Fragebogens. Beispiel: Angenommen, eine MRL-Stufe umfasst fünf Fragen, die jeweils auf einer 5-Punkte-Likert-Skala beantwortet wurden. Erhält diese Stufe die Bewertungen {4, 4, 5, 5, 5}, so liegt der Median bei 5 und die Stufe gilt als bestanden. Die Entropie ist in diesem Fall niedrig, da die Antworten relativ homogen ausfallen. Bei einer Verteilung wie {2, 3, 4, 5, 5} liegt der Median zwar bei 4 (Stufe bestanden), die höhere Entropie verdeutlicht jedoch, dass die Einschätzungen innerhalb der Bewertungsgruppe deutlich stärker auseinandergehen, was gezielte Nachbefragungen oder Item-Anpassungen auslösen kann.

Der resultierende MRL-Gesamtwert der Technologie entspricht weiterhin der höchsten Stufe, die von MRL 1 an ununterbrochen bestanden wurde. Die Ergebnisse nicht bestandener Stufen liefern dabei entscheidende diagnostische Hinweise auf die spezifischen Handlungsfelder, die zur Erreichung des nächsthöheren Reifegrads notwendig sind.

Tabelle 2: Ausgewählte Fragen aus dem MRL-Assessment-Fragebogen

Dimension (MRL-Stufe)	Exemplarische Frage	Theoretisches Fundament (Skalen-Kategorie)
MRL 1: Bedarfsspezifikation	Ist eine Beschreibung oder Quantifizierung der erwarteten Funktionalitäten eines Produkts, einer Dienstleistung oder einer Technologie verfügbar?	<i>TOE / Technological Context</i>
MRL 2: Value Proposition	Ist die technologische Lösung kostengünstiger als etablierte Technologien oder befindet sie sich auf einem klaren Pfad zur Kostenparität innerhalb von 3 bis 5 Jahren?	<i>DIT / Relative Advantage</i>
MRL 3: Markterwartungen	Sind die erwarteten Leistungs- oder Kostenvorteile auf einem klaren Entwicklungspfad, der innerhalb von 3 Jahren realisiert werden kann?	<i>DIT / Relative Advantage</i>
MRL 4: Einbettungsfähigkeit und Infrastruktur	Wurde eine Risikobewertung bezüglich der Integration in die bestehende Infrastruktur durchgeführt?	<i>DIT / Compatibility</i>
MRL 5: Skalierbarkeit und Legitimität	Ist die Nutzung und Herstellung der Technologie, des Produkts oder der Dienstleistung allgemein gesellschaftlich akzeptiert?	<i>CARAT / Societal Barriers</i>
MRL 6: Rechtliche Rahmenbedingungen	Sind die rechtlichen und regulatorischen Aspekte der Technologie für die relevantesten Märkte bekannt und veröffentlicht?	<i>CARAT / Regulatory Risk</i>
MRL 7: Domestizierung und Bereitschaft zur Veränderung	Erhöht der Einsatz der Lösung die Chancen des Anwenders auf persönliche Vorteile wie Gehaltserhöhung, Arbeitsreduzierung, Beförderung oder soziale Anerkennung?	<i>UTAUT / Performance Expectancy</i>

5 Anwendungsbeispiel: Bewertung einer Brain-Computer-Interface-Anwendung anhand des TAMARA-Frameworks

Nachdem die Methodik des *TAMARA*-Frameworks dargelegt wurde, wird dessen praktische Anwendung nun an einem vereinfachten Fallbeispiel aus dem Bereich der Neurotechnologie illustriert. Eine Brain-Computer-Interface (BCI)-Anwendung ist in besonderem Maße an der Schnittstelle von technischer Machbarkeit, hohem medizinischem Nutzen und komplexen gesellschaftlichen sowie regulatorischen Herausforderungen angesiedelt. Gegenstand der Bewertung ist eine nicht-invasive BCI-Anwendung zur motorischen Rehabilitation der oberen Extremitäten (Arm/Hand) nach einem Schlaganfall. Das System besteht hier unter anderem aus einer EEG-Kappe, die Gehirnaktivität misst, und einer Software, die die Bewegungsabsicht des Patienten erkennt. Diese Signale steuern ein medizinisches Exoskelett, das den betroffenen Arm des Patienten physisch führt.

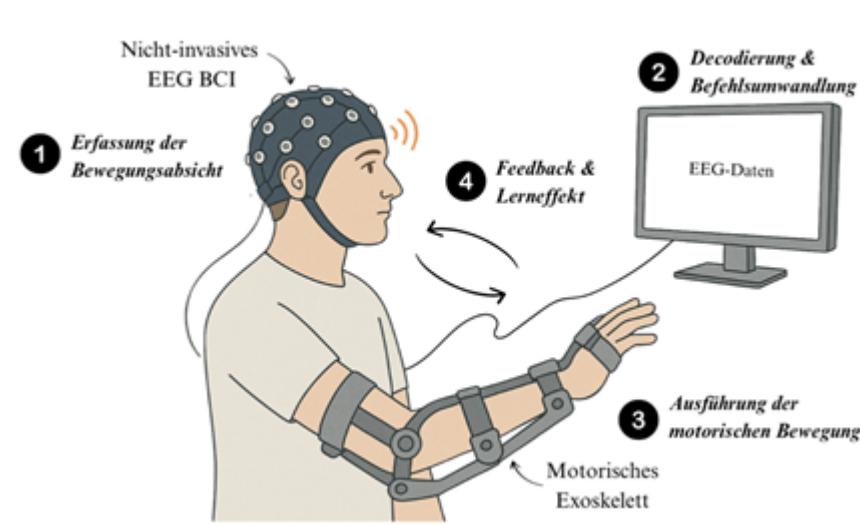


Bild 3: Vereinfachte Darstellung der BCI-Anwendung (eigene Darstellung)

5.1 Eingliederung der Technologie & Durchführung des Assessments

Zunächst wurde der technologische Reifegrad (TRL) der Anwendung bewertet. Basierend auf dem aktuellen Forschungsstand, der für BCI-Systeme zur Arm-Rehabilitation erste erfolgreiche Pilotstudien mit Patienten im klinischen Umfeld nachweist, wird die Anwendung als TRL 5 eingestuft. Es wird dabei für dieses Fallbeispiel angenommen, dass die Mindestkriterien, wie der Nachweis einer funktionalen Verbesserung bei einer kleinen Patientengruppe und ein grundlegendes Risikomanagement, im Rahmen dieser initialen Studien erfüllt wurden.

Anschließend wurde der MRL-Fragebogen beantwortet. Während die Bewertung der frühen Stufen (MRL 1-4) positiv ausfällt und das hohe technologische Potenzial sowie den klaren Bedarf widerspiegelt, ergibt sich für die höheren, auf die gesellschaftliche Skalierung ausgerichteten Stufen eine deutlich kritischere Einschätzung (siehe Tabelle 3). Diese Bewertung basiert maßgeblich auf den Ergebnissen einer vorgelagerten Analyse zur gesellschaftlichen und ethischen Wahrnehmung von BCI-Anwendungen. Diese zeigte, dass die Akzeptanz von drei zentralen Säulen abhängt: einer positiven öffentlichen Haltung, einem robusten regulatorischen Rahmen und einem transparenten Risikomanagement [Kle25]. Vor diesem Hintergrund erlangt die Anwendung in seinen Antworten des Fragebogens bei MRL 5: Skalierbarkeit und Legitimität einen Median von 3 und gilt somit als nicht bestanden. Zusätzliche Quellen belegen, dass das öffentliche Verständnis von BCIs aktuell noch fragmentiert ist und erhebliche ethische Unsicherheiten, etwa bezüglich des Umgangs mit neuronalen Daten, bestehen [Far23, ZLY+24]. Diese Faktoren stehen einer breiten gesellschaftlichen Legitimität derzeit noch entgegen. Ähnliche Defizite werden für MRL 6 (Rechtliche Rahmenbedingungen) und MRL 7 (Domestizierung) angenommen, da laut der Analyse von [Kle25] sowohl ein adäquater regulatorischer Rahmen als auch Strategien zur Förderung des Nutzervertrauens durch transparente Kommunikation noch fehlen.

Aufgrund des Scheiterns bei MRL 5 wird der Gesamt-Marktreifegrad der BCI-Anwendung auf MRL 4 festgesetzt. Die Analyse macht deutlich, dass die primären Hürden für diese technolo-

gisch fortgeschrittene Anwendung nicht mehr technischer Natur sind, sondern in der Notwendigkeit liegen, aktiv das Vertrauen der Öffentlichkeit, der Nutzer und der Institutionen zu gewinnen.

Die zusammengefassten Ergebnisse für die sieben MRL-Stufen sind in Tabelle 3 dargestellt. Neben dem Median wird die Shannon-Entropie ausgewiesen, um den Grad der Einigkeit innerhalb der Antworten zu erfassen. Die hohe Entropie (1,45) zeigt, dass die Bewertungen hier stärker streuen und somit kein klarer Konsens vorliegt.

Tabelle 3: Ergebnisse des MRL-Assessments für die BCI-Technologie

MRL	Name	Median	Shannon-Entropie*	Bestanden?
1	Bedarfsspezifikation	5	0,26	Ja
2	Value Proposition	5	0,32	Ja
3	Markterwartungen	4	0,78	Ja
4	Einbettungsfähigkeit & Infrastruktur	4	0,66	Ja
5	Skalierbarkeit & Legitimität	3	1,45	Nein
6	Rechtliche Rahmenbedingungen	n.a.	n.a.	<i>Nicht relevant</i>
7	Domestizierung & Veränderung	n.a.	n.a.	<i>Nicht relevant</i>

*Shannon-Entropie in Bits ($\log 2$); 0 = voller Konsens, max. = $\log 2(5) \approx 2,32$ Bits (stärkste Uneinigkeit). Die Entropie dient als optionale Zusatzdiagnose und beeinflusst nicht das Bestanden-Kriterium (Median ≥ 4)

Das Ergebnis der kombinierten Bewertung wird nun in der *TAMARA*-Matrix visualisiert. Das Bewertungsobjekt für die BCI-Anwendung wird gemäß seiner ermittelten Reifegrade auf den Koordinaten (TRL 5, MRL 4) platziert. Da es sich um ein kapitalintensives Medizintechnik-Vorhaben mit hohem F&E-Aufwand handelt, wird es durch ein großes, kreisförmiges Bewertungsobjekt dargestellt, wie in Bild 4 gezeigt.

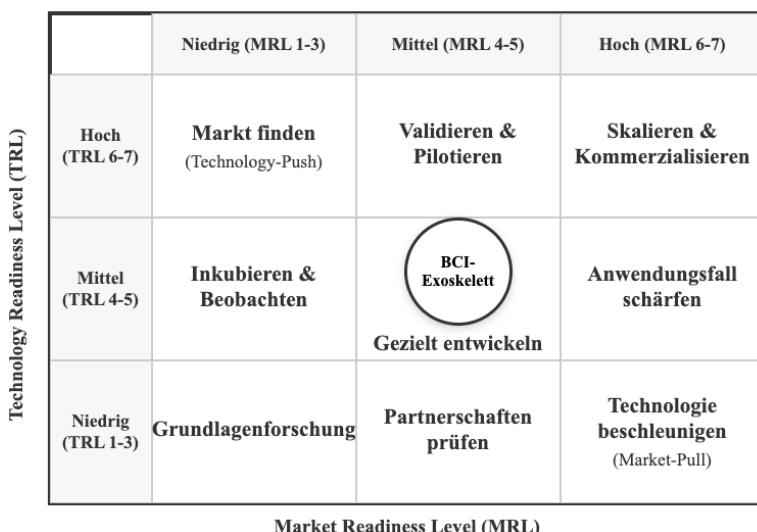


Bild 4: Visuelle Einordnung der BCI-Exoskelett Anwendung in das TAMARA-Framework

5.2 Interpretation und Handlungsempfehlungen

Die Positionierung des Bewertungsobjekts im Zentrum der Matrix, in der strategischen Zone "Gezielt entwickeln" signalisiert auf den ersten Blick ein Projekt, das auf beiden Achsen Fortschritte macht, aber noch nicht reif für eine Markteinführung ist. Die eigentliche strategische Einsicht ergibt sich jedoch aus der Detailanalyse, die zu dieser Positionierung geführt hat: Der kritische Engpass, der das Projekt auf MRL 4 hält, ist das Nichtbestehen von Skalierbarkeit und Legitimität.

Daraus lässt sich eine klare strategische Handlungsempfehlung ableiten: Der Fokus der Weiterentwicklung sollte derzeit nicht ausschließlich auf das Erreichen von TRL 6 aus technischer Sicht gerichtet sein. Stattdessen müssen die Ressourcen gezielt eingesetzt werden, um die identifizierten MRL-Hürden zu überwinden. Konkrete Maßnahmen umfassen die Planung breiterer, multizentrischer klinischer Studien zur Stärkung der Evidenz, den proaktiven Dialog mit Ethikkommissionen und Zulassungsbehörden (im Kontext der EU-MDR) sowie die Entwicklung von Kommunikationsstrategien, um die Akzeptanz in der medizinischen Fachwelt und der Gesellschaft zu erhöhen. Im Zuge der weiteren technologischen Entwicklung sollte der Mensch und die Gesellschaft mit ihren Sorgen berücksichtigt werden.

Das *TAMARA*-Framework dient somit nicht nur als Status-quo-Analyse, sondern als strategischer Kompass, der die kritischsten, oft nicht-technischen Handlungsfelder für die nächste Entwicklungsphase klar priorisiert und aufzeigt.

6 Diskussion, Limitationen und Ausblick

Das in diesem Beitrag vorgestellte *TAMARA*-Framework hat zum Ziel, die Lücke zwischen der Bewertung technologischer Reife und marktseitiger Erfolgsfaktoren zu schließen. Anhand der kritischen Reflexion, der Ableitung von Implikationen und eines Ausblicks wird der Beitrag des Frameworks abschließend eingeordnet.

Die primäre Stärke des *TAMARA*-Frameworks liegt in seinem integrativen Charakter, der die isolierte Betrachtung von Technik- und Marktreife überwindet. Weitere Stärken sind die wissenschaftliche Fundierung durch die Synthese etablierter Theorien sowie die hohe Informationsdichte der Visualisierung. Gleichzeitig unterliegt das Framework auch Limitationen. Die Bewertung basiert auf der subjektiven Einschätzung der antwortenden Personen. Eine empirische Erhebung ist oft mit großem Aufwand verbunden, was in der Praxis gegebenenfalls nur bedingt umsetzbar ist. Zudem stellt eine einzelne Bewertung immer nur einen statischen Schnapschuss dar und erfordert für eine dynamische Sichtweise regelmäßige Neubewertungen. Die gewählte Stage-Gate-Logik für den MRL bietet zwar eine hohe Verständlichkeit, birgt aber eine gewisse methodische Starrheit, da Fortschritte in höheren Stufen erst nach dem formalen Bestehen der vorherigen Stufe im Endergebnis sichtbar werden.

Methodisch wurde bewusst der Median als Auswertungsmaß gewählt, um die ordinalskalierte Natur der Likert-Daten korrekt abzubilden und Verzerrungen durch Mittelwerte zu vermeiden. Ergänzend ermöglicht die Shannon-Entropie, den Grad des Konsenses bzw. der Uneinigkeit

innerhalb der Antworten sichtbar zu machen, was zusätzliche diagnostische Hinweise für die Weiterentwicklung des Fragebogens liefert.

Das hier vorgestellte Framework versteht sich als ein konzeptueller Rahmen, der auf vielfältige Weise weiterentwickelt werden kann. Ein zentraler nächster Schritt ist die breitere empirische Validierung des Instruments. Neben vertieften Fallstudien in der Neurotechnologie sollte das Framework auch in anderen Technologiebereichen (z. B. Robotik oder Energietechnologien) angewendet werden, um seine Robustheit und Übertragbarkeit zu überprüfen. Erste explorative Anwendungen im Bereich industrieller Robotik deuten bereits darauf hin, dass trotz hoher technologischer Reifegrade (TRL 7–8) insbesondere marktseitige Faktoren wie Einbettungsfähigkeit oder regulatorische Aspekte kritische Engpässe darstellen. Dies verdeutlicht, dass die Matrix nicht nur für hochregulierte Zukunftstechnologien wie Neurotechnologie, sondern ebenso für etabliertere industrielle Innovationen relevante strategische Einsichten liefern kann. Hierfür bietet sich insbesondere die Arbeit mit interdisziplinären Projektteams, bestehend aus Ingenieuren, Produktmanagern und klinischen Experten, an.

Trotz des aktuell umfangreichen Fragebogens könnte eine weitere Skalenintegration erfolgen. Eine besonders vielversprechende Perspektive liegt in der (teil-)automatisierten Datenerhebung. Mittels KI-gestützter Analyse von Marktreports, Patentdatenbanken oder Social-Media-Stimmungen könnten Teile des MRL-Assessments objektiviert und der manuelle Erhebungsaufwand reduziert werden. In Kombination mit longitudinalen Studien, die Technologieprojekte über mehrere Jahre hinweg mit der *TAMARA*-Matrix begleiten, ließen sich so typische Entwicklungspfade und Erfolgsmuster identifizieren und die Praxistauglichkeit weiter erhöhen.

Literatur

[DSM+24] DADASHI, A.; SCHÖNMANN, A.; MARTINI, M.; JOHN, M.: Technologie-Reifegradbewertung im Gesundheitswesen – Eine bibliometrische Analyse. In: Pfannstiel, M. A. (Hrsg.): Technologien und Technologiemanagement im Gesundheitswesen – Potenziale nutzen, Lösungen entwickeln, Ziele erreichen. Springer Gabler, Wiesbaden, 2024, S. 227–250

[Dav89] DAVIS, F. D.: Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, (13)3, 1989, S. 319

[Far23] FARAHANY, N. A.: The Battle for Your Brain: Defending the Right to Think Freely in the Age of Neurotechnology. St. Martin's Press, New York, 2023

[GCS+20] GILLANI, F.; CHATHA, K. A.; SADIQ JAJJA, M. S.; FAROOQ, S.: Implementation of digital manufacturing technologies: Antecedents and consequences. *International Journal of Production Economics*, (229), 2020, S. 107748

[GC19] GHOBAKHLOO, M.; CHING, N. T.: Adoption of digital technologies of smart manufacturing in SMEs. *Journal of Industrial Information Integration*, (16), 2019, S. 100107

[HHS+24] HAYNES, K.; HARRIS, G.; SCHALL, M. C.; LIU, J.; DAVIS, J.: Gauging the Technology Acceptance of Manufacturing Employees: A New Measure for Pre-Implementation. *Sustainability*, (16)12, 2024, S. 4969

[Kle25] KLEINE, K.: Barriers to Brain-Computer-Interface applications in neuromedicine: Societal and ethical perception. Poster Presentation. Munich, Germany, 2025

[MS20] MASOOD, T.; SONNTAG, P.: Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry*, (121), 2020, S. 103261

[Man09] MANKINS, J. C.: Technology readiness assessments: A retrospective. *Acta Astronautica*, (65)9-10, 2009, S. 1216–1223

[RS10] REINHART, G.; SCHINDLER, S.: A Strategic Evaluation Approach for Defining the Maturity of Manufacturing Technologies. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, (4)11, 2010, S. 1291–1296

[Rog83] ROGERS, E. M.: *Diffusion of innovations*. 3. Auflage, Free Press, New York, NY, 1983

[Sch24] SCHÖNmann, A.: Transformation needs adoption: A conceptual framework to develop technology implementation strategies. Proceedings of the 14th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Chemnitz University of Technology, Dezember 2024

[TF90] TORNATZKY, L. G.; FLEISCHER, M.: *The processes of technological innovation*. 4th Edition, Lexington Books, Lexington, Mass., 1990

[TMC+23-ol] TIAN, L.; MEES, J.; CHAN, V.; DEAN, W.: Commercial Adoption Readiness Assessment Tool (CARAT). Unter: https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-03/Commercial%20Adoption%20Readiness%20Assessment%20Tool%20%28CARAT%29_030323.pdf, 20. Juni 2025

[VMD+03] VENKATESH, V.; MORRIS, M. G.; DAVIS, G. B.; DAVIS, F. D.: User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, (27), 2003, S. 425–478

[ZLY+24] ZHANG, H.; LE JIAO; YANG, S.; LI, H.; JIANG, X.; FENG, J.; ZOU, S.; XU, Q.; GU, J.; WANG, X.; WEI, B.: Brain-computer interfaces: the innovative key to unlocking neurological conditions. *International journal of surgery* (London, England), (110)9, 2024, S. 5745–5762

Autoren

Katharina Kleine studierte Global Foresight and Technology Management an der Technischen Hochschule Ingolstadt. Seit 2024 arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Bayerischen Foresight-Institut der Technischen Hochschule Ingolstadt. Ihre Forschungsschwerpunkte sind Zukunftstechnologien und Neuroethik.

Prof. Dr. Alexander Schönmann ist Forschungsprofessor für „Technology Design and Application“ an der Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen sowie Studiengangleiter für den Master „Global Foresight and Technology Management“ an der Technischen Hochschule Ingolstadt. Er fokussiert in seiner Forschungstätigkeit die Themenfelder der „Technologievorausschau“, der „antizipativen Technologieplanung und -bewertung“ sowie der Gestaltung von Technologieentwicklungsprozessen. Er hat seinen methodischen Schwerpunkt in der Entwicklung von Methoden und Modellen gesetzt, welche wirkende Unsicherheiten und Unschärfen berücksichtigen können.

Prof. Dr. Jan Oliver Schwarz ist Professor für Strategic Foresight und Trendanalysen an der Technischen Hochschule Ingolstadt und leitet das Bayerische Foresight-Institut. Seine Forschungsschwerpunkte sind strategische Vorausschau, Szenarioplanung und die Rolle von Corporate Foresight bei der Entscheidungsfindung. Er hat zahlreiche Publikationen zu diesem Thema veröffentlicht und arbeitet aktiv mit Unternehmen bei der vorausschauenden Strategieentwicklung zusammen.

Session VIII

Nachhaltigkeit als strategischer Erfolgsfaktor – ein Framework für die unternehmerische Nachhaltigkeitstransformation

**Friederike Dohmann¹, Daniela Hobscheidt¹, Gia Vy Vo¹, Christian Kürpick¹,
Roman Dumitrescu²**

¹ Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM, friederike.dohmann@iem.fraunhofer.de,
daniela.hobscheidt@iem.fraunhofer.de, gia.vy.vo@iem.fraunhofer.de,
christian.kuerpick@iem.fraunhofer.de

² Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn, roman.dumitrescu@hni.uni-paderborn.de

Zusammenfassung

Unternehmen stehen zunehmend unter Druck, ökonomisch, ökologisch und sozial verantwortungsvoll zu handeln. Auslöser dafür sind u. a. gesetzliche Regulierungen oder veränderte Marktanforderungen. Aufgrund der steigenden Komplexität des Themas ist Unternehmen oft unklar, in welchen Bereichen Handlungsbedarf besteht und wie dieser priorisiert werden sollte. Die Priorisierung ist zum einen abhängig vom jeweiligen Wissensstand eines Unternehmens, der sich je nach Unternehmensgröße, Branche, etc. unterscheiden kann. Zum anderen vom unternehmensspezifischen Transformationsdruck hinsichtlich der Nachhaltigkeit. So gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen externen Treibern zur Berücksichtigung der Nachhaltigkeit (z. B. Gesetzgebung), die auf das Unternehmen einwirken. Es resultiert die Notwendigkeit für eine Strukturierung der Nachhaltigkeits-Treiber und -Transformationsfelder, sodass Unternehmen ihren individuellen Transformationspfad ableiten können.

In diesem Beitrag wird ein Rahmenwerk zur ganzheitlichen Nachhaltigkeitstransformation vorgestellt. Es besteht aus zwei Betrachtungsebenen. Zum einen aus der externen Perspektive, d.h. dem Transformationsdruck. Verschiedene Nachhaltigkeits-Treiber werden analysiert und zu Treiberkategorien zusammengefasst. Zudem werden für jede Kategorie Motivationsstufen entwickelt, die die Dringlichkeit zur Berücksichtigung der relevanten Treiber darstellen. Zum anderen aus der internen Perspektive, d.h. dem individuellen Transformationspfad. Basierend auf Literaturrecherchen, Experteninterviews und Workshops mit Unternehmen konnten sieben Transformationsfelder identifiziert und auf einem Pfad angeordnet werden. Durch die Aufbereitung jedes Transformationsfeldes in strukturierten Wissenskarten werden Unternehmen bspw. Definitionen und typische Handlungsansätze bereitgestellt. Zusammenfassend stellt dieser Beitrag einen ganzheitlichen Orientierungsrahmen zur strategischen Verankerung der Nachhaltigkeitstransformation im Unternehmen dar.

Schlüsselworte

Nachhaltigkeitstransformation, Unternehmensmodell, Nachhaltigkeits-Treiber, unternehmens-individueller Transformationspfad

Sustainability as a strategic success factor – a framework for corporate sustainability transformation

Abstract

Companies are under increasing pressure to act in an economically, ecologically and socially responsible manner. Triggers for this include legal regulations or changing market requirements. Due to the increasing complexity of the issue, it is often unclear to companies in which areas there is a need for action and how this should be prioritized. On the one hand, prioritization depends on a company's respective level of knowledge, which can vary depending on the size of the company, industry, etc. On the other hand, a decisive factor is the transformation pressure with regard to sustainability that highly impacts companies. For example, there are a large number of different external drivers for considering sustainability (e.g. legislation). As a result, it is necessary to structure the sustainability drivers and transformation fields so that companies can derive their individual transformation path.

This article presents a framework for holistic sustainability transformation. It consists of two levels of consideration. Firstly, from the external perspective, i.e. the transformation pressure. Various sustainability drivers were analyzed and grouped into driver categories. In addition, motivation levels were developed for each category, which represent the urgency of considering the relevant drivers. Secondly, from the internal perspective, i.e. the individual transformation path. Based on literature research, expert interviews and workshops with companies, seven transformation fields were identified and arranged on a path. By breaking down each transformation field into structured knowledge maps, companies are e. g. provided with definitions and typical approaches. In summary, this article provides a holistic orientation framework for the strategic anchoring of sustainability transformation in the company.

Keywords

Sustainability transformation, framework, sustainability drivers, company-specific transformation path

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich das Thema Nachhaltigkeit zu einem zentralen strategischen Erfolgsfaktor für Unternehmen entwickelt. Angesichts wachsender ökologischer Krisen, gesellschaftlicher Erwartungen und regulatorischer Anforderungen sehen sich Organisationen zunehmend unter Druck, ihre Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsketten im Sinne der Nachhaltigkeit neu zu denken. Gleichzeitig eröffnet eine proaktive Nachhaltigkeitstransformation neue Potenziale für Innovationen, Wettbewerbsfähigkeit und langfristige Wertschöpfung [KWE+24]. Auch kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) stehen somit unter dem steigenden Druck, innerhalb der ökologischen und sozialen Grenzen zu agieren. Dies bedingt die Integration nachhaltiger Formen des Wirtschaftens in die gesamte Organisation – und damit eine ganzheitliche Transformation der Aufbau- und Ablauforganisation [Fro25].

Eine zentrale Herausforderung für Unternehmen ist dabei die Unsicherheit sowie die dynamische Entwicklung regulatorischer Vorgaben. Verschiedene Nachhaltigkeits-Treiber wirken in unterschiedlichem Ausmaß auf KMU ein [DL24]. Zudem fehlt Unternehmen durch die Komplexität und Vielschichtigkeit des Nachhaltigkeitsbegriffs ein klarer Strukturierungsrahmen, welcher zu einem langfristigen strategischen Erfolgsfaktor werden kann. Es existieren bereits einige wenige Rahmenmodelle, die das Thema sehr generalistisch angehen und viel Vorwissen voraussetzen ([Kem16]; [Ner14]; [She24]). Diese sind jedoch nicht zugeschnitten auf den Wissensstand der Anwender und fokussieren meist wenige Handlungsfelder sehr konzentriert. Hinzu kommt eine starke Fokussierung auf gesetzliche und regulatorische Vorgaben, die in der Form aktuell noch nicht für KMU in Kraft getreten sind [Eur25a]. Folglich entsteht daraus eine mangelnde Betrachtung von spezifischen Bedarfen und Herausforderungen für KMU.

Ziel des vorliegenden Beitrags ist eine methodische Unterstützung von produzierenden KMU in Form eines Orientierungsrahmens für die ganzheitliche Nachhaltigkeitstransformation. Dazu erfolgt in *Kapitel 2* zunächst eine Analyse der besonderen Voraussetzungen im Mittelstand sowie eine Kategorisierung der untersuchten Bedarfe und Herausforderungen von KMU. Darauf folgend wird der behandelte Themenkomplex in den aktuellen Stand der Forschung eingeordnet (*Kapitel 3*), woraufhin das Unternehmensmodell zur ganzheitlichen Steuerung der Nachhaltigkeitstransformation in KMU vorgestellt wird. Das Unternehmensmodell basiert auf einer Literaturanalyse sowie auf Experteninterviews und -workshops. Die Ergebnisse werden anschließend in Form von Nachhaltigkeits-Treibern und Transformationsfeldern im Unternehmensmodell verortet (*Kapitel 4*). Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Inhalte sowie ein Ausblick auf weitere zu analysierende Fragestellungen im Themenfeld der unternehmerischen Nachhaltigkeitstransformation (*Kapitel 5*). Die vorliegenden Ergebnisse sind maßgeblich aus dem Forschungsprojekt Green.OWL¹ heraus entstanden. Das Projekt Green.OWL hat sich zum Ziel gesetzt, den Wissens- und Technologietransfer auf regionaler Ebene voranzutreiben, indem

¹ Das Forschungsprojekt Green.OWL ist Teil des Projektaufrufs „Region.NRW – Transformation“ und wird aus Landesmitteln sowie Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) gefördert.

Methoden, Instrumente und Hilfsmittel erarbeitet werden, um eine wirtschaftsnahe Transformation der Region Ost-Westfalen-Lippe (OWL) anzustoßen, mit der Vision, diese zur Modellregion für Nachhaltigkeitstransformation zu befähigen.

2 Nachhaltigkeitstransformation im Mittelstand

Durch die Nachhaltigkeitstransformation werden tiefgreifende strukturelle Anpassungen in Unternehmen erforderlich. KMU kommt in diesem Prozess eine entscheidende Rolle zu, da diese einen wesentlichen Beitrag zur allgemeinen Wertschöpfung leisten. Laut der Europäischen Union (EU) fallen 99% aller Unternehmen in die Kategorie KMU [Eur25b]. Damit stellen sie einen systemrelevanten und entscheidenden Faktor für die Nachhaltigkeitstransformation dar. Zur Strukturierung der Nachhaltigkeitstransformation im Mittelstand werden zunächst grundlegende Begriffe definiert (*Kapitel 2.1*). Aufbauend darauf wird der steigende Transformationsdruck im Mittelstand beschrieben (*Kapitel 2.2*). Nachfolgend werden Bedarfe und Herausforderungen für die Nachhaltigkeitstransformation in KMU betrachtet (*Kapitel 2.3*).

2.1 Definition der Begriffe Nachhaltigkeit und nachhaltiger Transformation

Der Nachhaltigkeitsbegriff wird heutzutage in vielen Dimensionen verwendet. Die Bedeutung des Begriffs fokussiert die Befriedigung gegenwärtiger Bedürfnisse unter der Prämisse, zukünftige Generationen in ihrem Wirken nicht einzuschränken [Bun25]. In Verbindung mit der Strömung der unternehmerischen Verantwortung ergeben sich drei Betrachtungsebenen, die ökologische, soziale und ökonomische Nachhaltigkeit [Kro19].

Im Kern der **ökologischen** Nachhaltigkeit geht es um die Diskussion von Handlungsweisen zur Nutzung natürlich vorkommender Ressourcen [Ley25]. Dabei ist eine verantwortungsvolle Nutzung dieser nur dann gegeben, wenn nicht mehr verbraucht wird, als natürlich regeneriert werden kann. So soll eine Verfügbarkeit der natürlichen Ressourcen für künftige Generationen sichergestellt werden. Zudem fällt unter den Begriff der ökologischen Nachhaltigkeit der umweltverträgliche Einsatz von Rohstoffen und zu verarbeitenden Materialien [Lip24]. Für Unternehmen bedeutet dies, den Ressourcen- und Energieverbrauch auf ein Minimum zu reduzieren und durch nachhaltige Innovationen zu optimieren [Lip24].

Die **soziale** Nachhaltigkeit beschäftigt sich mit der Überlebensfähigkeit der Menschen durch die Sicherstellung grundlegender Menschenrechte und damit verbundenen Grundbedürfnissen. In der Arbeitswelt wird darunter ebenfalls das Thema der Chancengleichheit gefasst, welches impliziert, dass Arbeitskräfte gerecht und angemessen für ihre Tätigkeit entlohnt werden. Gleichermaßen sollen Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit dabei im Fokus stehen [Lip24].

Die **ökonomische** Nachhaltigkeit betrachtet die langfristige Überlebensfähigkeit von Unternehmen, die auf Basis ihres Geschäftsmodells und der dahinterstehenden Wertschöpfungskette gewinnbringend wirtschaften [Lip24]. Dabei steht die Gewinnmaximierung immer unter Restriktion der begrenzten Verfügbarkeit der natürlichen Ressourcen [Now25].

Dabei reicht die Betrachtung der drei Dimensionen von einem gleichberechtigten Verhältnis im Verständnis des Drei-Säulen-Modells hin zu einer integrativen Betrachtung der dynamischen Wechselwirkungen unter Berücksichtigung der planetaren Grenzen beispielsweise nach dem Modell der Doughnut Economy ([NGL23]; [Raw17]). Ein umfassender Wandel im Sinne einer Nachhaltigkeitstransformation erfordert ein langfristiges und ganzheitliches Umdenken im Unternehmen welches sich an der integrativen Betrachtung der drei Dimensionen orientiert und nachfolgend definiert wird ([NGL23]; [Raw17]).

Der Begriff der **nachhaltigen Transformation** beschreibt einen tiefgreifenden langfristigen Veränderungsprozess in Unternehmen ([Str24]; [WHK+23]). Dieser geht jedoch über das theoretisch normative Rahmenwerk hinaus und fokussiert eine praktische Implementierung nachhaltiger Maßnahmen. Davon betroffen sind nahezu alle Unternehmensbereiche, von grundlegenden betrieblichen Strukturen, der Unternehmensstrategie bis hin zu operativen Abläufen und Prozessen [RBA+23]. Durch eine integrative Betrachtung der Nachhaltigkeitsdimensionen, kann eine Transformation des Unternehmens hin zu Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit führen.

2.2 Steigender Transformationsdruck für KMU

Die Rahmenbedingungen, die durch eine integrative Betrachtung des Nachhaltigkeitsbegriffs neu definiert werden verändern die ökonomischen, ökologischen und sozialen Grenzen, in denen KMU agieren und wirtschaften, fundamental [Bet23]. Durch diesen Zielkonflikt entsteht Transformationsdruck, der sich aus einer Vielzahl ineinander greifender Nachhaltigkeits-Treiber zusammensetzt [Pac22]. Zur Definition der Wechselwirkungen zwischen unternehmensinternen Prozessen und darauf einwirkender Nachhaltigkeits-Treiber kann das Modell der **doppelten Wesentlichkeitsanalyse** herangezogen werden. Die doppelte Wesentlichkeitsanalyse beschreibt eine Methodik zur Bewertung und Priorisierung von relevanten Nachhaltigkeitsthemen [BA24]. Ihr Ursprung liegt in der Finanzberichterstattung, später wurde das Konzept durch eine systematische Weiterentwicklung bestehender Nachhaltigkeitsstandards in der EU-Berichtspflicht Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) verankert [Eur22]. Dabei werden zwei Perspektiven zur Betrachtung hinzugezogen - die Auswirkungen des Unternehmens auf Umwelt und Gesellschaft (*Inside-Out-Perspektive*) als auch die Auswirkungen von Umwelt und Gesellschaft auf das Unternehmen (*Outside-In-Perspektive*) [GB24] (siehe Bild 1).

Inside-out-Perspektive: Diese Perspektive beschreibt die Auswirkungen betrieblicher Aktivitäten auf die Umwelt und Gesellschaft [BG25]. Dabei werden beispielhaft die Themen Emissionen, Ressourcennutzung und soziale Auswirkungen auf die Lieferkette betrachtet. Die Inside-out-Perspektive analysiert so die unternehmerische Verantwortung für die zuvor beschriebenen durch das Unternehmen verursachten Auswirkungen [BM23].

Outside-in-Perspektive: Die Outside-In-Perspektive betrachtet den Einfluss unternehmensexterner Faktoren auf die wirtschaftliche Situation des Unternehmens [BG25]. Sie hat zum Ziel externe Risiken, wie beispielsweise Klimawandelfolgen, gesellschaftliche Erwartungen oder regulatorische Anforderungen zu adressieren. Diese Perspektive untersucht, wie externe Auswirkungen auf den finanziellen Erfolg und die Resilienz des Unternehmens wirken [BM23].

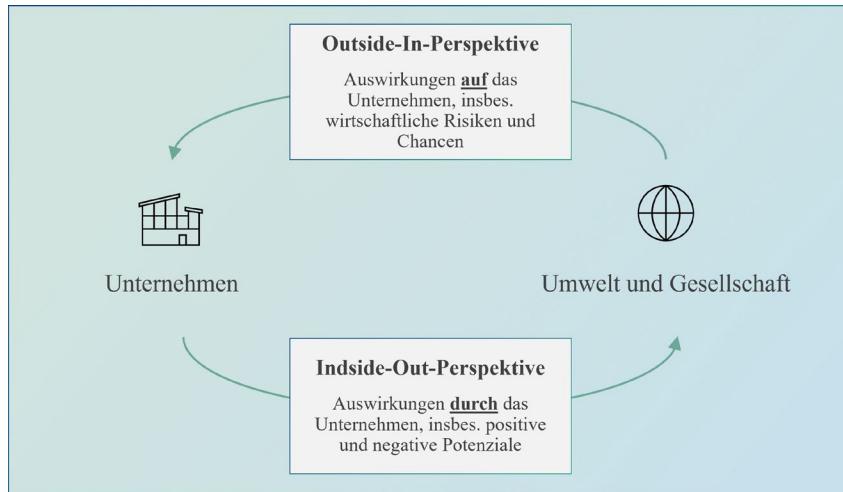


Bild 1: Perspektiven der doppelten Wesentlichkeit (eigene Darstellung in Anlehnung an BAUMÜLLER UND MAYR (2023))

KMU sind zum aktuellen Zeitpunkt nur bedingt von Nachhaltigkeitsberichtserstattungspflichten betroffen. Grund dafür sind Übergangsfristen und abgestufte Anforderungen, die auf verschiedener Indikatorik, wie beispielsweise den Größenkriterien Mitarbeiterzahl und Bilanzsumme, basieren [Kro25]. Trotz der fehlenden direkten rechtlichen Verpflichtung ist der Mittelstand oft indirekt über die Lieferkette betroffen. Für viele KMU ist es daher unausweichlich, sich mit ausgewählten Aspekten der Berichtssystematik auseinanderzusetzen. Die doppelte Wesentlichkeitsanalyse ist zudem nicht ausschließlich als technische Voraussetzung zur pflichtmäßigen Berichterstattung anzusehen, sondern bietet ebenso ein strategisches Instrument, dass Unternehmen befähigt, Nachhaltigkeit systematisch in der Organisation zu verankern und darauf aufbauend zukunftsfähige Geschäftsmodelle zu entwickeln [BM23]. Um ein besseres Verständnis über die wachsenden Anforderungen von außen (Outside-In) und den inneren Anpassungsdruck (Inside-Out) zu erlangen, werden nachfolgend Bedarfe und Herausforderungen im Rahmen der Nachhaltigkeitstransformation von KMU analysiert.

2.3 Bedarfe und Herausforderungen für den Mittelstand

Die Transformation hin zum nachhaltigen Wirtschaften stellt KMU vor vielfältige Herausforderungen und leitet konkrete Bedarfe ab. Diese lassen sich in die folgenden Themenblöcke einsortieren.

Regulatorische Anforderungen und erhöhte Informationsbedarfe: KMU sehen sich zunehmend indirekt mit einer erhöhten Komplexität regulatorischer Vorgaben konfrontiert. Gesetze, Transparenz- und Berichtspflichten sowie Leitlinien auf nationaler oder europäischer Ebene erfordern eine intensive Auseinandersetzung mit nachhaltigkeitsbezogenen Themen. Auch

wenn viele dieser Anforderungen nicht unmittelbar verpflichtend sind, entstehen dennoch Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Relevanz und der konkreten Umsetzung. KMU fehlen dabei häufig Strukturen und Routinen sowie technisches Know-How, um systematisch auf diese neuen Anforderungen reagieren zu können ([TL23]; [BH24]; [RL24]; [RBB+17]; [Got23]).

Marktdynamik, Kundenpräferenzen und Wettbewerbsdruck: Der gesellschaftliche Wertewandel wirkt sich zunehmend auf Kundenpräferenzen aus. Nachhaltigkeitsbezogene Aspekte werden vermehrt zu einem entscheidendem Kaufkriterium. Dies zwingt KMU ihre Marktpositionierung und ihr Geschäftsmodell zu überdenken. Die strategische Integration von nachhaltigen Elementen ist zudem aufgrund heterogener Stakeholdererwartungen schwer vorhersehbar. Bei einer ausbleibenden Reaktion auf die veränderten Marktanforderungen und Kundenerwartungen können Nachteile im internationalen Wettbewerb entstehen ([SR23]; [TL23]; [BH24]; [Hau24]).

Technologische Herausforderungen und Digitale Transformation: Die fortschreitende Digitalisierung setzt Innovationspotenziale für nachhaltige Prozesse frei. Bestehende Strukturen in KMU sind dabei mit Veränderungen und organisatorischen Anforderungen konfrontiert. In vielen Fällen erschweren eine fehlende Datenbasis an Nachhaltigkeitskennzahlen sowie eine mangelnde Datenqualität die Einführung digitaler Lösungen und verzögern somit den ganzheitlichen dualen Transformationsprozess ([TL23]; [BH24]; [Hau24]).

Externe Rahmenbedingungen - Klima, Energie und Demografie: Externe Faktoren beeinflussen die Transformationsfähigkeit von KMU erheblich. Die stärker sichtbar werdenden Folgen des Klimawandels werfen z. B. grundsätzliche Fragestellungen rund um die zukünftige Energieversorgung und -sicherheit auf. Hinzu kommen demografische Veränderungen, wie beispielsweise der fortschreitende Fachkräftemangel, der Unternehmen dazu zwingt, resilenter zu werden und Anpassungen auf strategischer sowie operativer Ebene umzusetzen [SR23].

Mittelständische Unternehmen stehen im Kontext der Nachhaltigkeitstransformation vor vielfältigen strukturellen Herausforderungen. Regulatorische Anforderungen gelten als komplex und schwer interpretierbar. Zugleich bestehen vielfach unzureichend ausgeprägte unternehmensinterne Prozesse, Zuständigkeiten und Routinen zur Erfüllung gesetzlicher Berichtspflichten ([TL23]; [BH24]; [RL24]; [RBB+17]; [Got23]). Veränderte Kundenpräferenzen, heterogene Stakeholdererwartungen sowie ein steigender Wettbewerbsdruck erschweren die strategische Positionierung und Marktintegration nachhaltiger Geschäftsmodelle ([SR23]; [TL23]; [BH24]; [Hau24]). Technologische Hemmnisse zeigen sich insbesondere in Form unzureichender Datenverfügbarkeit und -qualität sowie Umsetzungsbarrieren bei der Einführung innovativer Lösungen ([TL23]; [BH24]; [Hau24]). Darüber hinaus wirken externe Faktoren wie Energieunsicherheit, klimabedingte Risiken und demografischer Wandel als zusätzliche Herausforderung, die die Transformationsfähigkeit von KMU wesentlich mitbestimmen [SR23].

3 Stand der Forschung

In der Literatur ist die Relevanz der unternehmerischen Transformation zur Erreichung globaler Nachhaltigkeitsziele grundsätzlich nicht neu. Es existieren zahlreiche Ansätze, die sich mit der

Planung und Steuerung unternehmensinterner Prozesse aus Sicht einzelner Fachdisziplinen auseinandersetzen. Die Ansätze haben sich in den letzten Jahren kontinuierlich weiterentwickelt und integrieren zunehmend den Gedanken der ganzheitlichen Transformation von Organisationen. Um dies zu verdeutlichen werden im Folgenden drei Transformationsmodelle herangezogen, die aufgrund ihrer thematischen Nähe sowie des ähnlichen Betrachtungswinkels referenziert werden.

Transformationsmodell nachhaltiger Unternehmensführung durch Unternehmensentwicklung [Kem16]: Das Transformationsmodell von KEMNITZ verbindet nachhaltige Unternehmensführung mit der systematischen Anwendung von Organisations- und Personalentwicklungsansätzen [Kem16]. Es basiert auf einem dreistufigen Aufbau bestehend aus strategischer Zieldefinition, der Umsetzung geeigneter Maßnahmen sowie einer langfristigen Verfestigung im Unternehmensalltag. Die Transformation wird darin nicht als linearer Ablauf verstanden, sondern als kontinuierlicher Lern- und Veränderungsprozess. Zentrale Elemente des Modells sind die Verbindung struktureller Veränderungen in Prozessen und Systemen mit kulturellen Faktoren wie Führung, Kommunikation und Beteiligung [Kem16]. Ziel ist es, Nachhaltigkeit langfristig in die Organisation einzubetten und durch systemische Entwicklungssteuerung als festen Bestandteil der Unternehmensführung zu verankern [Kem16]. Das Transformationsmodell von KEMNITZ stellt einen konzeptionellen Ansatz zur nachhaltigen Unternehmensentwicklung dar, bleibt jedoch in der thematischen Ausdifferenzierung und operativen Umsetzungsorientierung begrenzt. Kontextuelle Rahmenbedingungen und organisationale Interdependenzen werden nur ansatzweise berücksichtigt.

Transformationsmodell für nachhaltiges Wirtschaften und nachhaltigen Erfolg [Ner14]: Das Transformationsmodell von NERTINGER basiert auf der Integration der Nachhaltigkeitsstrategien Effizienz, Konsistenz und Suffizienz [Ner14]. Es strukturiert nachhaltiges Wirtschaften entlang eines normativen Zielkorridors, der den Rahmen bietet, wirtschaftliche, gesellschaftliche und ökologische Anforderungen in Transformationsprozesse zu integrieren. Das Modell umfasst neun Handlungsräume, differenziert nach Ressourceneinsatz, Umweltbelastung und Innovationsgrad. Unternehmen werden als aktive Gestalter des Wandels verstanden, die durch die Veränderungen in Geschäftsmodellen und Prozessen zur Transformation beitragen. Ziel ist eine systematische Umgestaltung wirtschaftlicher Aktivitäten im Sinne natürlicher Kreisläufe [Ner14]. Das Transformationsmodell von NERTINGER bietet einen systemisch-normativen Orientierungsrahmen, bleibt jedoch in der thematischen Ausgestaltung und betriebspraktischen Umsetzung begrenzt. Externe Einflussfaktoren, organisationale Interdependenzen und kontextspezifische Anforderungen werden nicht systematisch berücksichtigt. Eine Operationalisierung und Messbarkeit des Zielkorridors erfolgt nicht.

Nachhaltigkeitstransformation: Sieben Schritte für die Umsetzung von Nachhaltigkeit im Unternehmen [She25]: SHEVELOV beschreibt Nachhaltigkeitstransformation als mehrstufigen, ganzheitlichen Veränderungsprozess, der über klassische Change-Ansätze hinausgeht [She25]. Im Zentrum stehen sieben aufeinander aufbauende Schritte, die auf eine tiefgreifende Neuaustrichtung von Strategie, Geschäftsmodellen und Unternehmenskultur zielen. Die Transformation beginnt mit der Entwicklung einer klaren Nachhaltigkeitsstrategie und dem Aufbau geeigneter Strukturen und Verantwortlichkeiten [She25]. Darauf folgen die Anpassung von Wert-

schöpfung und Geschäftsmodellen sowie der Förderung einer nachhaltigkeitsorientierten Unternehmenskultur. Abschließend wird die Vision durch Managementsysteme in operative Prozesse überführt. Ziel ist die dauerhafte Verankerung von Nachhaltigkeit im Unternehmen auf strategischer, struktureller und kultureller Ebene [She25]. Das Transformationsmodell von SHE-VELOV bietet einen strukturierenden Orientierungsrahmen, bleibt jedoch in der praktischen Umsetzung unspezifisch. Betriebliche Herausforderungen sowie unternehmensspezifische Bedarfe werden nicht systematisch adressiert. Eine methodische Konkretisierung sowie die Anpassung an externe Anforderungen erfolgen nicht.

Trotz der Dringlichkeit der integrativen Betrachtung der Nachhaltigkeitstransformation als gesamtunternehmerische Herausforderung mangelt es an adäquaten Ansätzen für die Zielgruppe KMU. Einzelne Ansätze tragen zur fokussierten Betrachtung aus bestimmten Fachdisziplinen, wie der Unternehmensführung bei, bilden die Nachhaltigkeitstransformation jedoch nicht vollumfänglich ab. Daher bedarf es einer methodisch strukturierten Unterstützung, die das Zusammenspiel von Nachhaltigkeits-Treibern und Transformationsfeldern für die Nachhaltigkeitstransformation in KMU darstellt. Dazu bietet sich ein Orientierungsrahmen in Form eines Unternehmensmodell an, in dem der ganzheitliche Transformationsprozess dargestellt wird.

4 Vorstellung des Unternehmensmodells *Green.KMU*

Gegenstand des folgenden Kapitels ist die Konsolidierung und Vorstellung des Unternehmensmodells *Green.KMU*, welches als methodischer Orientierungsrahmen für die strategische Planung der Nachhaltigkeitstransformation in Unternehmen fungiert. Das Modell greift wesentliche Transformationsfelder des nachhaltigen Wirtschaftens auf und integriert gleichzeitig die Betrachtungsebenen externer und interner Nachhaltigkeits-Treiber. Ferner beschreibt das Unternehmensmodell Interdependenzen zwischen den Transformationsfeldern und Nachhaltigkeits-Treibern. Ergänzende Hilfsmittel, die aufbauend auf das Rahmenwerk entwickelt werden, unterstützen KMU bei der systematischen Integration von nachhaltigen Formen des Wirtschaftens. Ausgehend davon können KMU ihren individuellen Transformationspfad ableiten.

4.1 Forschungsmethodik

Der entwickelte Orientierungsrahmen ist Ergebnis einer Konsortialforschung nach ÖSTERLE und OTTO [ÖO10]. Da die Nachhaltigkeitstransformation in KMU einen eher explorativen Charakter aufweist, wird zunächst eine Literaturanalyse mit Fokus auf aktuelle Bedarfe und Herausforderungen von KMU im Themenkomplex durchgeführt. Basierend darauf werden Themencluster synthetisiert und anwendungsorientiert in Form von Experteninterviews und -workshops erprobt, um die Anwendbarkeit des methodischen Rahmenwerks sicherzustellen.

Literaturanalyse: Im Rahmen einer iterativen Vorgehensweise wurde zunächst Fachliteratur zur Nachhaltigkeitstransformation mit Fokus auf aktuelle Bedarfe und Herausforderungen im Mittelstand analysiert. Die resultierenden Publikationen wurden anhand von Titel und Kurzzusammenfassung gesichtet. Ausschlusskriterien waren in diesem Schritt ein fehlender thematischer Fokus sowie eine mangelnde Fokussierung der Zielgruppe produzierender KMU. Die

ausgewählte Forschungsliteratur wurde systematisch aufbereitet und anhand verwandter Themenfelder strukturiert und geclustert.

Experteninterviews: Zur Anwendbarkeitssicherung und Praxistauglichkeit des Unternehmensmodells wurden fünf Experteninterviews durchgeführt. Die qualitativen, halbstrukturierten Interviews wurden parallel zu vier projektbezogenen Veranstaltungen in Form von Break-Out-Sessions umgesetzt. Vorbereitend dazu wurde ein Interviewleitfaden nach SAUNDERS, LEWIS und THORNHILL mit offenen Fragen erstellt [SLT19]. Dabei wurden generische Fragen zum Verständnis des Unternehmensmodells als auch Fragen zur wahrgenommenen Relevanz der Transformationsfelder und den darin adressierten Inhalten gestellt. Die Dauer der Interviews beläuft sich auf einen Zeitraum von zehn bis fünfzehn Minuten. Insgesamt wurden fünf Nachhaltigkeits- und Transformationsexperten aus KMU des produzierenden Gewerbes sowie Multiplikatoren, wie beispielsweise Vertreter der regionalen Wirtschaftsförderungen befragt. Die Knergebnisse der Interviews wurden aufgrund forschungspraktischer Gründe nicht durch audio-visuelle sondern handschriftlich selektive Dokumentationen festgehalten. Die Auswertung erfolgte im Hinblick auf die Kontextualisierung sowie eine initiale Einschätzung zur Relevanz und Anwendbarkeitssicherung des Modells. Diese explorative Einschätzung wurde mit Hilfe einer Clusterung der Kernaussagen sowie Zuordnung dieser zu den Transformationsfeldern des Unternehmensmodells abgeleitet.

Expertenworkshops: Zur weiteren Überprüfung der Anwendbarkeit des Unternehmensmodells wurden im Rahmen von vier projektbezogenen Veranstaltungen Expertenworkshops mit der Zielgruppe des Unternehmensmodells durchgeführt. Dabei wurde das Unternehmensmodell mit seinen Transformationsfeldern vorgestellt. Ein halbstrukturierter Gruppenworkshop mit präparierten Leitfragen und moderierter Diskussion diente der Validierung und Weiterentwicklung des Unternehmensmodells. Der partizipative Ansatz der Workshops diente der kritischen Reflexion einzelner Modellkomponenten. So konnte auf praxisnahes Fach- und Erfahrungswissen zurückgegriffen werden. Die Workshop-Ergebnisse wurden auf einer Unternehmensmodell-Canvas dokumentiert und nachträglich thematisch strukturiert.

Für die Konsolidierung des Unternehmensmodells wurden die Informationen aus der Literaturanalyse, den Experteninterviews und -workshops systematisch synthetisiert. Die Interview- und Workshopergebnisse wurden auf thematische Überschneidungen analysiert und den entsprechenden Handlungsfeldern zugewiesen. Dies bildet die Grundlage für die weitere Ausdetaillierung der Modellkomponenten des Orientierungsrahmens, die im Folgenden vorgestellt werden.

4.2 Definition des externen Transformationsdrucks

Auf Basis der vorgestellten Forschungsmethodik resultiert ein Unternehmensmodell zur ganzheitlichen Nachhaltigkeitstransformation in KMU. Dieses konstituiert ein idealtypisches und abstrahiertes Abbild realer unternehmerischer Zusammenhänge. Das Unternehmensmodell besteht aus zwei Betrachtungsebenen, die sich aus externen Nachhaltigkeits-Treibern und Transformationsfeldern zusammensetzen und bei der strategischen Planung der Nachhaltigkeitstransformation berücksichtigt werden sollen.

Die Aggregation der vorgestellten unternehmerischen Bedarfe und Herausforderungen in Bezug auf die Nachhaltigkeitstransformation resultiert aus Sicht der *Outside-In-Perspektive* in insgesamt vier Treiberkategorien (vgl. Kapitel 2.3). Die Stufen sind dabei so gewählt, dass sie die unterschiedlichen Ausprägungen des externen Transformationsdrucks auf Unternehmen widerspiegeln. Mithilfe der motivationstheoretischen Lehre zu extrinsischer und intrinsischer Motivation sowie zur Selbstbestimmungstheorie nach RYAN UND DECI wurde der Motivationsgrad der Treiberkategorien hergeleitet [RD06]. Dieser reicht von fremdbestimmter Transformation durch regulatorischen Zwang bis hin zu indirektem Druck der z. B. durch den gesellschaftlichen Wertewandel oder mögliche Reputationsschäden ausgeübt wird. Die in *Bild 2* dargestellten externen Nachhaltigkeits-Treiber *Regulierungen und Gesetzgebung*, *Marktanforderungen und Kundenerwartungen*, *Technologische Entwicklungen* sowie *Globale Herausforderungen und Krisen* werden nachfolgend vorgestellt.

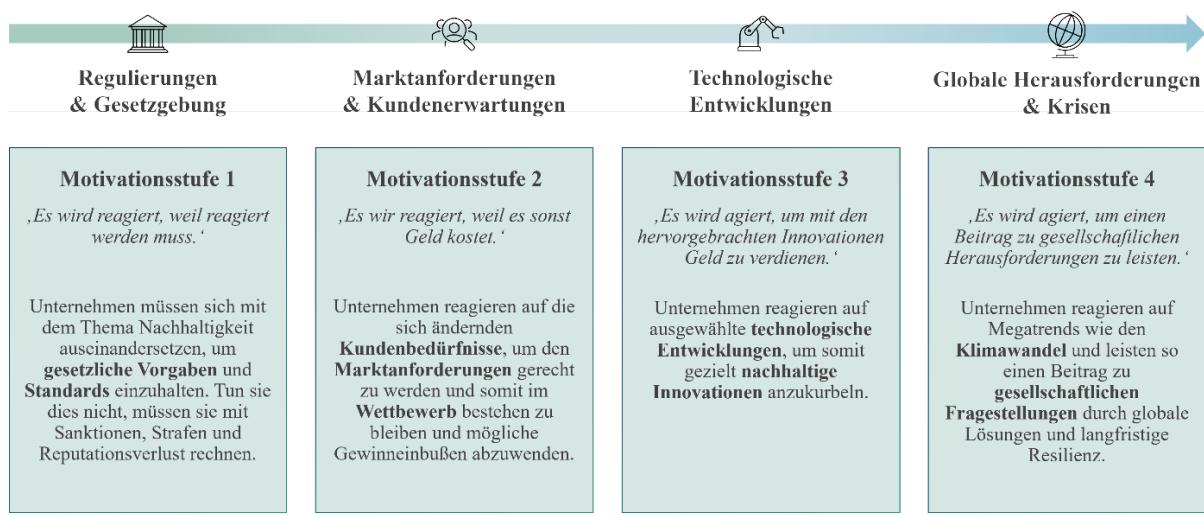


Bild 2: Motivationsstufen externer Nachhaltigkeits-Treiber

Motivationsstufe 1 - Regulierungen und Gesetzgebung: Regulierungen und Gesetze schaffen Anreize, die ein nachhaltiges Wirtschaften erzwingen und eine freiwillige Handlung zu meist übertreffen. Dabei ist zwischen verschiedenen Arten regulatorischer Anforderungen zu unterscheiden. Gesetze und Regulierungen stellen verbindliche Regeln dar, die durch staatliche Institutionen erlassen werden und in Sanktionen münden können (z.B. Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz (LkSG)) ([Wie16]; [SS24]). Berichts- und Transparenzpflichten verpflichten Unternehmen dazu, Informationen offen und nachvollziehbar darzulegen (z.B. CSRD) [Umw22]. Der Handlungsdruck, der von der Regulatorik ausgeht, kann Unternehmen sowohl direkt als auch indirekt beeinflussen. Beispielsweise können Kaskadeneffekte entlang der Lieferkette dazu führen, dass Unternehmen aufgrund von Anforderungen durch Großkunden indirekt von der Berichtspflicht betroffen sind [GBO+23]. Durch die Treiber-Kategorie entsteht somit ein stark extrinsisch motivierter und fremdbestimmter Handlungsdruck.

Motivationsstufe 2 - Marktanforderungen und Kundenerwartungen: Durch einen Generations- und Wertewandel ist wahrzunehmen, dass sich das Konsumverhalten hin zu mehr Umweltbewusstsein wandelt [HK12]. Eine verzögerte Reaktion auf diesen Trend kann die Außen darstellung des Unternehmens negativ beeinflussen. Demgegenüber steht das Potenzial der Differenzierung vom Wettbewerb durch nachhaltige Innovationen und die Erschließung neuer

Märkte und Kundengruppen ([SR23]; [TL23]; [BH24]). Marktanforderungen und Kundenerwartungen sind stark extrinsisch motiviert, da sie die wirtschaftlichen Erträge, die Positionierung im Wettbewerb und somit das langfristige Überleben von Unternehmen beeinflussen.

Motivationsstufe 3 - Technologische Entwicklungen: Durch technologische Markttrends und -veränderungen entsteht Innovationsdruck bei Unternehmen. Sie eröffnen neue Handlungsmöglichkeiten und befähigen die Nachhaltigkeitstransformation, indem digitale Technologien gezielt eingesetzt werden, um die Transformation mess- und steuerbar zu machen. Zudem entstehen durch digitale Lösungen erhebliche Effizienzpotenziale, die Katalysatoreffekte bei der Nachhaltigkeitstransformation auslösen ([TL23]; [BH24]). Die Entwicklung neuer, nachhaltiger und technologiezentrierter Geschäftsmodelle prägt Marktstandards und Branchentrends, die wiederum zu veränderten Innovationserwartungen führen. Somit lässt sich festhalten, dass die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten digitaler Technologien Potenzial bieten, um die ökologische und soziale Transformation wirtschaftsgetrieben zu befähigen.

Motivationsstufe 4 - Globale Herausforderungen und Krisen: Globale Herausforderungen und Krisen sind systemische Störungen, die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft gleichzeitig betreffen und somit sichtbar machen, dass die Resilienz des globalen Ökosystems langfristig gesehen auch die Überlebensfähigkeit von Unternehmen bedingt [SR23]. Beispielsweise rufen Extremwetterereignisse oder Ressourcenknappheiten in Folge der Klimakrise Volatilität hervor, wodurch Schwachstellen bestehender Geschäftsmodelle aufgedeckt werden. Als Reaktion darauf entsteht gesellschaftlicher und politischer Druck welcher zunehmend in verändertem Konsumverhalten mündet [SR23]. Die Auswirkungen globaler Herausforderungen und Krisen setzen einen externen Transformationsimpuls, indem die Dringlichkeit und Relevanz des vorausschauenden und resilienten Wirtschaftens aufgezeigt wird.

Die vier Motivationsstufen fließen in Form der *Outside-In-Perspektive* in die Betrachtung des Unternehmensmodells und seiner Transformationsfelder ein, die nachfolgend vorgestellt werden.

4.3 Transformationsfelder des Unternehmensmodells

Gegenstand dieses Abschnitts ist die Vorstellung eines Unternehmensmodells für die Nachhaltigkeitstransformation in KMU. Ziel ist es, einen Orientierungsrahmen für die Nachhaltigkeitstransformation von produzierenden Unternehmen zu erschaffen, die unter Berücksichtigung der Handlungsfelder eine Übersicht über die Transformationsaktivitäten und entsprechenden Handlungsansätze erlangen sollen (vgl. *Bild 3*). Das in Bild 3 vorliegende Transformationsmodell gliedert sich in zwei Betrachtungsebenen und greift so zum einen die *Outside-In-Perspektive* der doppelten Wesentlichkeitsanalyse durch die Darstellung der externen TransformationsTreiber auf (vgl. *Kapitel 4.2*). Andererseits wird die *Inside-Out-Perspektive* durch die unternehmerische Verantwortung und den intrinsischen Handlungsdruck innerhalb der Transformationsfelder betrachtet. Im Sinne der Fokussierung und Priorisierung der unternehmerischen Nachhaltigkeitstransformation wird das Unternehmensmodell demnach in insgesamt sieben Transformationsfelder unterteilt. Die Transformationsfelder sind thematisch abgegrenzte Handlungsfelder, in denen eine Veränderung angestoßen werden muss, um ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeitsziele zu erreichen. Das Unternehmensmodell setzt kein

Vorwissen über die Nachhaltigkeitstransformation voraus und ist damit ein niederschwelliges und managementgerecht aufbereitetes Hilfsmittel für den Einstieg in nachhaltige Transformationsaktivitäten.

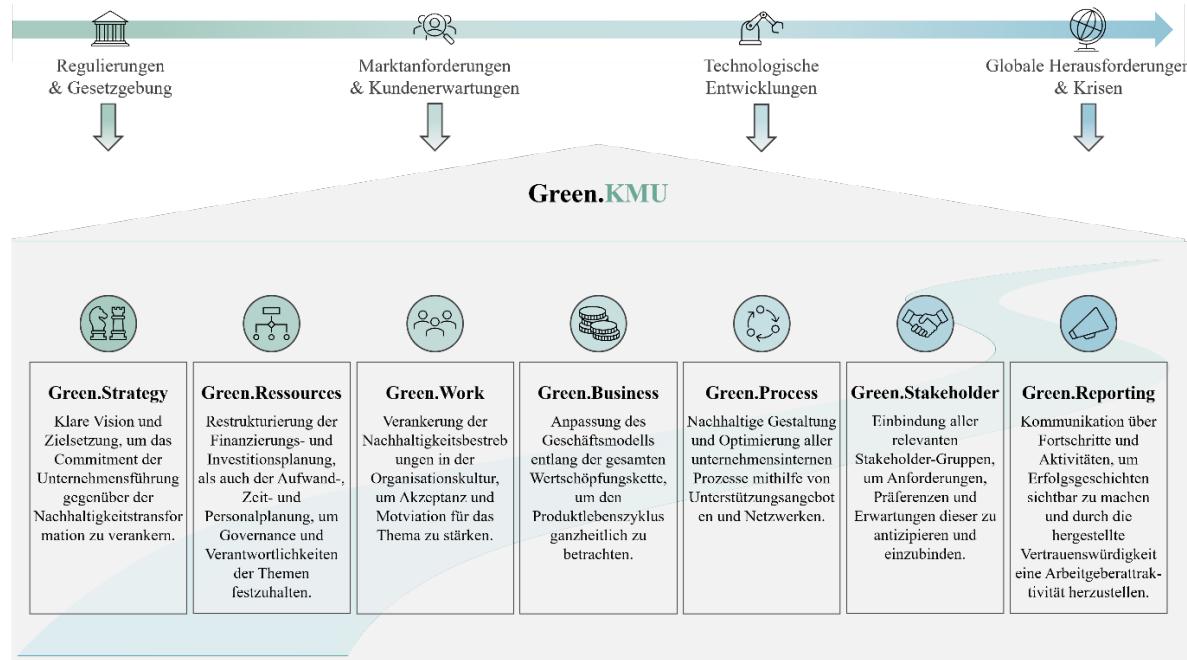


Bild 3: Unternehmensmodell für die Nachhaltigkeitstransformation in KMU

Die thematischen Kategorien weisen wechselseitige Abhängigkeiten untereinander auf. Die Transformationsfelder bauen dabei logisch aufeinander auf, jedoch erfolgt die Transformation in der unternehmerischen Praxis nicht zwingend sequentiell, sondern wird durch strategische Ziele, spezifische Bedarfe oder die Verfügbarkeit von Ressourcen bedingt. Im Ergebnis entsteht ein situativ adaptierbarer Transformationspfad. Das Unternehmensmodell schafft Struktur, lässt gleichzeitig aber auch Flexibilität für die praktische Implementierung zu. Die sieben Transformationsfelder werden nachfolgend vorgestellt.

Green.Strategy: Green.Strategy beschreibt die strategische Verankerung von Nachhaltigkeit als Führungs- und Steuerungsaufgabe im Unternehmen. Ziel ist es, eine klare Vision und verbindliche Leitlinien zu definieren, um die Nachhaltigkeitstransformation systematisch zu initiieren und zu steuern. Im Zentrum steht ein mehrstufiger Strategieprozess: die initiale Zielklärung und Kommunikation, die Analyse des Status quo, die Priorisierung relevanter Themen mittels Wesentlichkeitsanalyse, die Ableitung geeigneter Maßnahmen sowie deren Umsetzung [ET19]. Diese strukturierte Vorgehensweise ermöglicht es, interne Potenziale und externe Anforderungen zielgerichtet zu integrieren [Wun24]. Für Unternehmen schafft Green.Strategy Orientierung, Verbindlichkeit und Handlungssicherheit. Herausforderungen ergeben sich häufig durch Ressourcenengpässe oder fehlende Verankerung auf oberster Führungsebene [Wun24]. Gleichzeitig bietet das Feld die Chance, Nachhaltigkeit konsistent im Kerngeschäft zu verankern und als strategischen Wettbewerbsvorteil zu nutzen. Green.Strategy ist eng mit den Feldern Green.Process, Green.Reporting und Green.Stakeholder verknüpft und bildet das Fundament der unternehmensweiten Nachhaltigkeitstransformation.

Green.Resources: Green.Resources beschreibt den nachhaltigen Umgang mit unternehmerischen Ressourcen. Unterschieden wird zwischen materiellen (z. B. Rohstoffe), immateriellen (z. B. Daten, IT-Systeme), finanziellen (z. B. Investitionen in Effizienztechnologien) und personellen Ressourcen (z. B. Mitarbeitendenkompetenz). Das Ziel ist die effiziente Steuerung und Optimierung der Ressourcennutzung, um langfristige Wertschöpfung zu gewährleisten. Im Zentrum steht dabei die Anwendung von Strategien der Kreislaufwirtschaft. Ansätze wie Reduktion, Wiederverwendung, Reparatur und Recycling zielen auf die Schließung von Stoffkreisläufen und die Verlängerung von Produktlebenszyklen ab ([Pri22]; [RCB18]). Diese Strategien helfen, Umweltwirkungen zu minimieren, Kosten zu senken und die Ressourceneffizienz zu steigern. Green.Resources ist eng mit Green.Work und Green.Process verknüpft und bildet eine zentrale Grundlage für die betriebliche Nachhaltigkeitstransformation.

Green.Work: Green.Work bezeichnet die gezielte Integration ökologischer und sozialer Nachhaltigkeit in die Arbeitswelt. Im Zentrum stehen nachhaltige Arbeitsmodelle, wertebasierte Führung und ein verantwortungsvolles Personalmanagement ([EMS23]; [Pri22]). Das Ziel ist die strukturelle Verankerung von Nachhaltigkeit in der Unternehmenskultur, beginnend mit der strategischen Ausrichtung, über die Gestaltung der Arbeitsumgebung, bis hin zur Führung der Mitarbeitenden [EMS23]. Für Unternehmen ist Green.Work von hoher strategischer Bedeutung. Es steigert die Arbeitgeberattraktivität und fördert langfristige Resilienz durch flexible und ressourcenschonende Arbeitsweisen [BH24]. Es fördert zudem innovative Arbeitsformen, stärkt die interne Akzeptanz von Nachhaltigkeitszielen und erhöht die Bindung der Mitarbeitenden [Pri22]. Es steht in enger Verbindung zu Green.Stakeholder, etwa durch Beteiligungsformate im Arbeitskontext, sowie zu Green.Resources durch nachhaltige Arbeitsplatzgestaltung und effizienten Ressourceneinsatz.

Green.Business: Green.Business beschreibt die nachhaltige Ausrichtung unternehmerischer Wertschöpfung entlang bestehender Geschäftsmodelle. Im Fokus steht die Integration ökologischer, sozialer und ökonomischer Zielsetzungen, basierend auf den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft ([Pri22]; [EMS23]). Ziel ist es, Ressourcen effizient zu nutzen, Umweltbelastungen zu verringern und Geschäftsprozesse langfristig resilient und zukunftsfähig zu gestalten. Statt auf lineare Wertschöpfung zu setzen, fördern nachhaltige Geschäftsmodelle zirkuläre Ansätze, stärken transparente Lieferketten und beziehen Stakeholder aktiv ein. Dabei unterstützt die Digitalisierung eine effizientere Steuerung und macht Nachhaltigkeit mess- und kommunizierbar [EMS23]. Green.Business steht in enger Verbindung zu Green.Resources, Green.Process und Green.Stakeholder und bildet die strategische Grundlage für eine ganzheitliche Nachhaltigkeitstransformation im Unternehmen.

Green.Process: Green.Process bezeichnet die nachhaltige Gestaltung und Steuerung unternehmensinterner Prozesse. Ziel ist es, Ressourcenverbräuche, Emissionen und soziale Auswirkungen systematisch zu erfassen, zu bewerten und prozessorientiert zu optimieren ([RCB18]; [ET19]). Im Zentrum steht ein iterativer Verbesserungsprozess – von der Status-quo-Analyse über die Priorisierung relevanter Handlungsfelder und Zieldefinition bis hin zur Umsetzung und kontinuierlichen Weiterentwicklung. Green.Process fördert Transparenz, Prozessqualität und Effizienz und ist eng mit Green.Resources, Green.Business und Green.Strategy verknüpft. Als operative Ebene der Nachhaltigkeitstransformation stellt es sicher, dass Nachhaltigkeitsziele messbar und wirksam in den Unternehmensalltag integriert werden [vBS+12].

Green.Stakeholder: Green.Stakeholder bezeichnet die gezielte Einbindung interner und externer Anspruchsgruppen in unternehmerische Nachhaltigkeitsprozesse. Ziel ist es, relevante Erwartungen frühzeitig zu erfassen und in Entscheidungen zu integrieren, um Akzeptanz, Vertrauen und Legitimität zu sichern [Acc15]. Für Unternehmen ist Stakeholderdialog ein wesentlicher Erfolgsfaktor. Er unterstützt die Erfüllung regulatorischer Anforderungen, fördert Konfliktprävention und stärkt Beziehungen. Beteiligungsformate von der Konsultation bis zur Mitentscheidung ermöglichen tragfähige, zukunftsorientierte Nachhaltigkeitsstrategien [HT14]. Der strukturierte Dialog fördert Transparenz, ermöglicht Risikofrüherkennung und bringt externe Perspektiven in die Entwicklung unternehmerischer Nachhaltigkeitsmaßnahmen ein. Gleichzeitig stärkt die Beteiligung die interne Nachhaltigkeitskultur. Das Transformationsfeld ist eng mit Green.Reporting verknüpft. Während Green.Stakeholder den Dialog initiiert, stellt Green.Reporting eine transparente Rückkopplung sicher. Beide fördern gemeinsam eine glaubwürdige und partizipative Nachhaltigkeitskommunikation.

Green.Reporting: Green.Reporting bezeichnet die strukturierte Kommunikation von Nachhaltigkeitszielen, -maßnahmen und -fortschritten gegenüber internen und externen Anspruchsgruppen. Ziel ist es, Transparenz zu schaffen, Vertrauen aufzubauen und die strategische Verankerung von Nachhaltigkeit sichtbar zu machen ([Nel16]; [Wun24]). Berichte und Kommunikationsformate dienen nicht nur der Information, sondern auch der internen Steuerung, Mitarbeitermotivation und externen Positionierung. Sie helfen, Erfolge zu dokumentieren, Handlungsbedarfe zu identifizieren und relevante Zielgruppen zielgerichtet einzubinden. Durch den Einsatz geeigneter Methoden und Kanäle wie Nachhaltigkeitsberichte, Dashboards oder interne Plattformen wird die Anschlussfähigkeit der Unternehmenskommunikation sichergestellt. Green.Reporting ist eng mit Green.Stakeholder verknüpft, da Rückkopplung und partizipativer Austausch zentrale Voraussetzungen für glaubwürdige Nachhaltigkeitskommunikation sind [Nel16].

4.4 Wissenskarten

Aufbauend auf diesem strategischen Rahmenwerk werden die dazugehörigen Inhalte und individuelle Handlungsansätze in Form von Wissenskarten definiert und aufbereitet, um die darin enthaltenen Informationen strukturiert nutzbar zu machen, die komplexen Abhängigkeiten zu vereinfachen und gleichzeitig ein transparentes Kommunikationsmittel für geführte Umsetzungsworkshops bereitzustellen (vgl. *Bild 4*). Dabei sind die Wissenskarten in insgesamt sechs thematische Abschnitte unterteilt. Zunächst erfolgt eine Einordnung entlang des Transformationspfades, welcher den Fortschritt der Transformation angibt und Orientierung schafft. Im Rahmen einer Kurzbeschreibung werden das Transformationsfeld und die entsprechenden Inhalte definiert und erläutert. Darauffolgend wird aufgezeigt, welche strategischen Ziele mit der Transformation innerhalb des betrachteten Themenfeldes verfolgt werden. Zudem erfolgt ein Übertrag der externen Transformationstreiber auf das Transformationsfeld. Dabei wird die Wirkungsstärke, der in *Kapitel 4.2* definierten externen Treiber auf die in *Kapitel 4.3* erarbeiteten Transformationsfelder analysiert. Je nach Transformationsfeld bedingen die externen Treiber dieses in unterschiedlicher Auswirkung. Zudem finden sich in der Wissenskarte die themen-

spezifischen Bedarfe und Herausforderungen (vgl. *Kapitel 2.3*) wieder. Abschließend beinhalten die Wissenskarten typische Handlungsansätze und -empfehlungen, die erste Maßnahmen für die Transformation innerhalb des Handlungsfeldes definieren. *Bild 4* zeigt eine exemplarische Wissenskarte des Transformationsfeldes Green.Work.

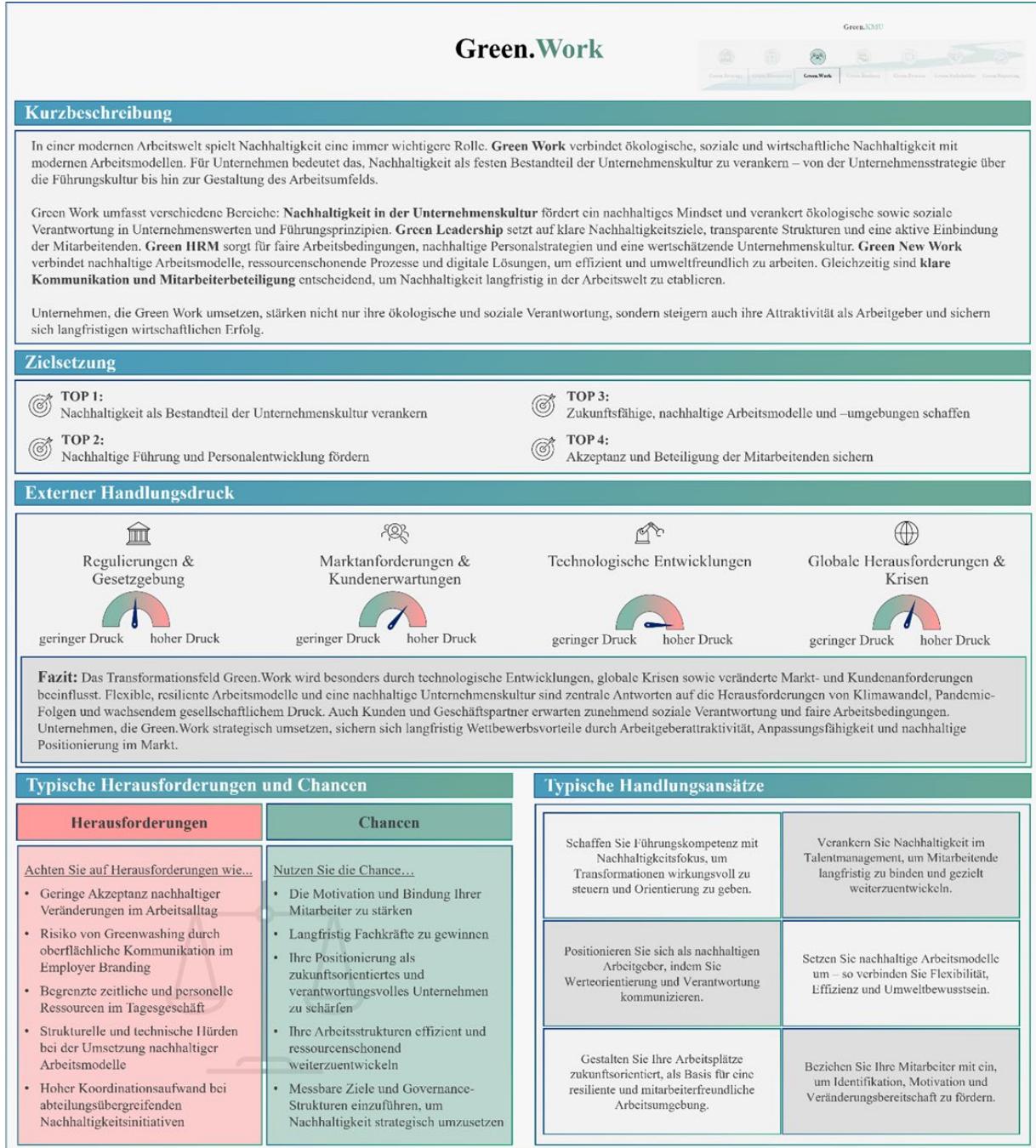


Bild 4: Wissenskarte des Transformationsfelds Green.Work

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in *Kapitel 4.2* definierten Nachhaltigkeits-Treiber externe Motivatoren für KMU darstellen. Die Transformationsfelder hingegen spiegeln den internen Handlungsdruck wider, der z. B. durch Überzeugung und Interesse der Belegschaft ausgeübt wird. Entscheidend für eine nachhaltige Transformation ist das Zusammenspiel beider Treiber-Kategorien, sodass letztendlich beide Impulse in der Entwicklung von fremdbestimmter Motivation hin zu selbstbestimmter Motivation münden. Fremdbestimmte Nachhaltigkeits-

Treiber erhöhen den Handlungsdruck und gelten als Impulsgeber und Orientierungsrahmen. Aus einer intrinsischen und somit selbstbestimmten Überzeugung heraus erfolgt die langfristig strategische Verankerung im Unternehmen mit entsprechender Antriebstiefe [RD06]. Das Unternehmensmodell richtet sich an die Anwendergruppe KMU und kann unabhängig vom individuellen Wissensstand genutzt werden. Die Nachhaltigkeitstransformation erfolgt in keinem Fall in jedem Unternehmen idealtypisch und linear, sondern muss zwingend an branchenspezifische Standards und unternehmensindividuelle Voraussetzungen angepasst werden. Je nach individueller Reife der Nachhaltigkeitsbestrebungen können KMU auf einer für sie passenden oder akut relevanten Transformationsstufe in den Prozess einsteigen, da jedes Transformationsfeld in sich kohärent ist, jedoch auch die entsprechenden Wechselwirkungen zu den weiteren Transformationsfeldern berücksichtigt. Für die praktische Umsetzungsplanung in KMU wird im weiteren Projektverlauf ein Lösungsbaukasten erarbeitet, der konkrete Maßnahmen je Transformationsfeld beinhaltet. Daraus kann ein individueller und bedarfsgerecht zusammengestellter Transformationspfad abgeleitet werden. Es resultiert eine individuelle Roadmap, auf der ausgewählte Maßnahmen zeitlich angeordnet werden. Insgesamt lässt sich festhalten, dass das Unternehmensmodell aufgrund der vielfältigen Berücksichtigung unterschiedlicher Herausforderungen und Nachhaltigkeits-Treiber einen flexiblen und individuell anpassbaren Transformationspfad ermöglicht. Somit kann das Modell auf die jeweilige Unternehmensrealität zugeschnitten werden und bleibt anschlussfähig, da es ein managementgerecht aufbereitetes Informationsangebot darstellt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Nachhaltigkeitstransformation stellt aufgrund der Vielschichtigkeit und hohen Komplexität eine Herausforderung für Unternehmen dar. Insbesondere KMU sind aufgrund von begrenzten Ressourcen und mangelndem Know-How noch nicht entsprechend auf die Transformation vorbereitet. Dabei muss die Nachhaltigkeitstransformation immer vor dem Hintergrund verschiedener interner und externer Nachhaltigkeits-Treiber betrachtet werden. Obwohl die Forschungslücke zur unternehmerischen Nachhaltigkeitstransformation zu großen Teilen erschlossen ist, mangelt es derzeit an praxisorientierten Ansätzen zur ganzheitlichen Planung der Nachhaltigkeitstransformation, die Bedarfe und Herausforderungen der Zielgruppe KMU entsprechend berücksichtigen. Dazu wurde zunächst auf Basis einer Literaturanalyse, sowie mithilfe von Experteninterviews und -workshops ein Unternehmensmodell entwickelt, welches die relevanten Transformations-Treiber und Transformationsfelder der Nachhaltigkeitstransformation beschreibt. Aufbauend darauf wurden Wissenskarten ausgearbeitet, die die wichtigsten Informationen kompakt und übersichtlich darstellen. Diese geben den Anwenderunternehmen einen Orientierungsrahmen und schaffen Klarheit über vorhandene Transformationsbedarfe.

Der vorliegende Beitrag stellt einen praxisorientierten Forschungsbeitrag des Projekts Green.OWL zur Steuerung der Nachhaltigkeitstransformation in Unternehmen dar. Entsprechend unterstützt der Beitrag das Projektziel die Region Ostwestfalen-Lippe (OWL) zu einer Modellregion für Nachhaltigkeitstransformation zu befähigen, indem durch die unternehmerische Nachhaltigkeitstransformation der Wirtschafts- und Industriestandort OWL gestärkt wird.

Im Rahmen der weiteren Forschungsarbeit des Projekts Green.OWL wird ein Lösungsbaukasten entwickelt, der Maßnahmen in Form von Methodiken und praktischen Umsetzungsformaten definiert und somit die Weichen für den individuellen Transformationspfad für Unternehmen setzt.

Aufbauend auf die Ergebnisse, die in diesem Beitrag vorgestellt wurden, bedarf es zukünftig einer Anpassung des Ansatzes über das Forschungskonsortium hinaus. Die Überführung des Unternehmensmodells in praktische Umsetzungsformate mit produzierenden KMU soll die Wirksamkeit und Anschlussfähigkeit des Modells unter dem Einfluss branchenspezifischer Charakteristika sicherstellen. Darüber hinaus wird eine Untersuchung der systemischen Wechselwirkungen zwischen den Transformationsfeldern, z. B. in Form von Wirkungsmodellen notwendig, um weitere Erkenntnisse über den individuellen Transformationsprozess von KMU zu erlangen. In diesem Zuge besteht aufgrund der dynamischen Entwicklung der internen und externen Treiber weiterer Forschungsbedarf, inwiefern im Zusammenspiel mit verschiedenen Ansätzen der Motivationstheorie das unternehmerische Handeln im Transformationsprozess beeinflusst wird.

Literatur

[Acc15] ACCOUNTABILITY: AA1000 Stakeholder Engagement Standards – Deutsche Übersetzung. 2015.

[BA24] BRÜNING, A.; ALMELING, C.: Welche ESG-Faktoren sind wichtig? In: Niggemann, K.A.; Dahlhausen, U.; Hofer, M. B.; Schmitz, R.; Everling, O. (Hrsg.) ESG als Treiber von M&A. Springer Gabler, Wiesbaden, 2024.

[Bet23] BETHKE, M.: Der ökologische Kontext: Der Klimawandel und die planetaren Grenzen (des Wachstums). In: Nachhaltiges Wirtschaften als Erfolgsfaktor. Essentials. Springer Gabler, Wiesbaden, 2023.

[BG25] BAUER, P.; GREILING, D.: Working Paper: Doppelte Wesentlichkeitsanalyse als zentraler Filter für die ESG-Berichterstattung in österreichischen und deutschen Stadtwerken. Ciriec International No. 2025/01.

[BH24] BODENSTEIN, C.; HERGET, M.: Strategisches Management der Nachhaltigkeit. Springer Gabler, Wiesbaden, 2024.

[BFJ22] BODEMANN, M.; FELLNER, W.; JUST, V.: Digitalisierung und Nachhaltigkeit – Transformation von Geschäftsmodellen und Unternehmenspraxis. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2022.

[BM23] BAUMÜLLER, J.; MAYR, J.: Quick Check: Wesentlichkeitsanalyse gemäß CSRD und ESRS. Unter: WWF_CSRD_Quick-Guide.pdf. Letzter Zugriff: 13. Juni 2025.

[Bun25] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG. Nachhaltigkeit (nachhaltige Entwicklung). Unter: Nachhaltigkeit (nachhaltige Entwicklung) BMZ. Letzter Zugriff: 10. Juni 2025.

[DL24] DIEM, M.; LÖCKNER, C.: Innovation als Treiber für nachhaltige Entwicklung. In: Systematic Innovation – Wie KMU ihre Zukunft nachhaltig innovative gestalten (Hrsg.) V. CAMPUS 02 Fachhochschule der Wirtschaft. Graz 02, 2024, Schriftenreihe Wissenschaft und Praxis, Band 16.

[EMS23] ENGELIEN, A.; MEYER, A.; SCHMIDT, F.: Nachhaltigkeit im Unternehmen – So gelingt der Einstieg. Haufe, Freiburg, 2023.

[Eur22] EUROPÄISCHES PARLAMENT: Richtlinie (EU) 2022/2464 des europäischen Parlaments und Rates. Amtsblatt der Europäischen Union. Straßburg, 2022.

[Eur25a] EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE – General for Financial Stability, Financial Services and Capital Markets Union. Omnibus package – Commission launched simplification package in February as part of increased focus on EU competitiveness. Unter: Omnibus package - European Commission. Letzter Zugriff: 10. Juni 2025.

[Eur25b] EUROPÄISCHES PARLAMENT: Kleine und mittlere Unternehmen. Online: Kleine und mittlere Unternehmen | Kurzdarstellungen zur Europäischen Union | Europäisches Parlament. Letzter Zugriff: 10. Juni 2025.

[ET19] ENGLERT, M.; TERNÈS, A.: Nachhaltiges Management – Nachhaltigkeit als exzellenten Managementansatz entwickeln. Springer Gabler, Berlin, 2019.

[Fro25] FRODL, A.: Organisatorische Nachhaltigkeit: Wodurch lässt sich die Aufbau- und Ablauforganisation des Gesundheitsbetriebs nachhaltig gestalten?. In: Nachhaltigkeitsmanagement im Gesundheitsbetrieb. Springer Gabler, Wiesbaden, 2025.

[GB24] GRABAU, M.; BREUER, C.: Nachhaltigkeit, öffentlicher Auftrag und die Finanzierung der Transformation des Mittelstands. In: Niggemann, K. A.M Dahlhausen, U.; Hofer, M. B.; Schmitz, R.; Everling, O. (Hrsg.) ESG als Treiber von M&A. Springer Gabler, Wiesbaden, 2024.

[GBO+23] GROTH, M.; BENDER S.; OLFERT, A.; SCHAUSER, I.; VIKTOR, E.: Kaskadeneffekte und kritische Infrastrukturen im Klimawandel. In: Brasseur, G. P.; Jacob, D.; Schuck-Zöller, S. (Hrsg.) Klimawandel in Deutschland. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2023.

[Got23] GOTHAER: Gothaer KMU-Studie 2023 – Nachhaltige Transformation des Mittelstands erfordert Zeit, Geld und Know-how. Unter: <https://www.mynewsdesk.com/de/barmenia/gothaer/press-releases/gothaer-kmu-studie-2023-nachhaltige-transformation-des-mittelstands-erfordert-zeit-geld-und-know-how-3244177>. Köln, 2023. Letzter Zugriff: 14. Juni 2025.

[Hau24] HAUFE: Corporate Sustainability Im Mittelstand -Typen, Treiber, Hemmnisse. 2024.

[HK12] HELLBRÜCK, J.; KALS, E.: Werte, Umweltbewusstsein und Nachhaltigkeit. In: Hellbrück, J.; Kals, E. (Hrsg.) Umweltpsychologie. Basiswissen Psychologie. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2012.

[HT14] HENTZE, J.; THIES, B.: Stakeholder-Management und Nachhaltigkeits-Reporting. Springer Gabler, Berlin, 2014.

[Kem16] KEMNITZ, M.C.: Transformationsmodell nachhaltiger Unternehmensführung durch Unternehmensentwicklung – Grundmodell betriebswirtschaftlicher Nachhaltigkeit. Springer Gabler, Wiesbaden, 2016.

[Kro19] KROPP, A.: Die Dimensionen der Nachhaltigkeit. In: Kropp, A. (Hrsg.) Grundlagen der Nachhaltigen Entwicklung. Essentials. Springer Gabler, Wiesbaden, 2019.

[Kro25] KROKER, R.: Veränderte Berichtspflichten durch EU-Omnibus-Initiative. Unter: Veränderte Berichtspflichten durch EU-Omnibus-Initiative - PwC. Letzter Zugriff: 13. Juni 2025.

[KWE+24] KUNZLMANN, J.; WESEMANN, P.; EDINGER-SCHONS, L. M.; KRÄMER, A.: Sustainability Transformation Monitor 2024. Bertelsmann Stiftung, Gütersloh, 2024.

[Ley25] LEYMAN, F.: ökologische Nachhaltigkeit. Unter: ökologische Nachhaltigkeit • Definition | Gabler Wirtschaftslexikon. Letzter Zugriff: 13. Juni 2025.

[Lip24] LIPPOLD, D.: Unternehmensführung und Nachhaltigkeit. Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 2024.

[Nel16] NELKE, A.: Kommunikation und Nachhaltigkeit im Innovationsmanagement von Unternehmen: Grundlagen für die Praxis. Springer Gabler, Wiesbaden, 2016.

[Ner14] NERTINGER, S.: Carbon and Material Flow Cost Accounting – Ein integrierter Ansatz im Kontext nachhaltigen Erfolgs und Wirtschaftens. Springer Gabler, Wiesbaden, 2014.

[NGL23] NOGUEIRA, E.; GOMES, S.; LOPES, J. M.: Triple Bottom Line, Sustainability, and Economic Development: What Binds Them Together? A Bibliometric Approach. Sustainability 2023, 15(8), 6706.

[Now25] NOWAK, A.: Ökonomische Nachhaltigkeit. Unter: ökonomische Nachhaltigkeit • Definition | Gabler Wirtschaftslexikon. Letzter Zugriff: 10. Juni 2025.

[ÖO10] ÖSTERLE, H.; OTTO, B.: Konsortialforschung: Eine Methode für die Zusammenarbeit von Forschung und Praxis in der gestaltungsorientierten Wirtschaftsinformatikforschung. *Business and Information Systems Engineering the international journal of Wirtschaftsinformatik*.

[Pac22] PACHMAJER, M.: Agenda 2030 – Kompetenzfelder für eine nachhaltige Wirtschaftsweise. In: Rump, J.; Eilers, S. (Hrsg). *Arbeiten in der neuen Normalität*. IBE-Reihe. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2022.

[Pri22] PRIESS, A.: *Green Company Transformation*. Haufe, Freiburg, 2022.

[Raw17] RAWORTH, K.: *Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st Century Economist*. Chelsea Green Publishing, 2017.

[RBA+23] REUTER, K.; BRAUN, C.; ARNOLD, F.; SCHLEPPHORST, K.; KEICH, F.: Abschlussbericht für die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU). Bundesverband Nachhaltige Wirtschaft e.V., 2023.

[RBB+17] RUPPERT-WINKEL, C.; BÖHM, M.; BRUNN, C.; FUNCKE, S.; KRESS-LUDWIG, M.; PAPKE, K.; SCHERF C.: Nachhaltiges Handeln in Unternehmen und Region. Zentrum für Erneuerbare Energien (ZEE), Freiburg, 2017.

[RCB18] REICHERT, C; CITO, B.; BARJASIC, A.: *Lean & Green: Best Practice – Wie sich Ressourceneffizienz in der Industrie steigern lässt*. Springer Gabler, Wiesbaden, 2018.

[RD06] RYAN, R. M.; DECI, E. L.: Self-Regulation and the Problem of Human Autonomy: Does Psychology Need Choice, Self-Determination, and Will? *Journal of Personality* 74.6 (2006):1557-1586.

[RL24] RIEGER-FELS, M.; LÖHER, J.: Nachhaltigkeit im Mittelstand – Die CSRD als Chance oder Herausforderung? Bertelsmann Stiftung, Gütersloh, 2024.

[She25] SHEVELOV, A.: Nachhaltigkeitstransformation: 7 Schritte für die Umsetzung von Nachhaltigkeit im Unternehmen. <https://www.haufe.de/id/beitrag/nachhaltigkeitstransformation-7-schritte-fuer-die-umsetzung-von-nachhaltigkeit-im-unternehmen-HI16350847.html>, Letzter Zugriff: 05.Juni.2025.

[SLT19] SAUNDERS, M.; LEWIS, P.; THORNHILL, A.: *Research methods for business students* (8. Auflage). Pearson, 2019.

[SR23] SCHLEPPHORST, S.; RIEGER-FELS, M.: Wie Unternehmen in NRW mit dem Klimawandel umgehen. Unter: https://www.ifm-bonn.org/fileadmin/data/redaktion/publikationen/chartbooks/Chartbook_Wie_Unternehmen_in_NRW_mit_dem_Klimawandel_umgehen.pdf. Institut für Mittelstandsforschung (IfM), Bonn, 2023. Letzter Zugriff: 14. Juni 2025.

[SS25] SCHNEIDER, A.; SCHMIDPETER, R. (Hrsg.): *Corporate Social Responsibility – Verantwortungsvolle Unternehmensführung in Theorie und Praxis*. Springer-Verlag, Berlin. Heidelberg 2015.

[SS24] SPIESSHOFER, B.; SPÄTH, P.: *Liferkettensorgfaltspflichtengesetz (LkSG)*. In: LkSG. Berliner Kommentare. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin, 2024.

[Str24] STRICKER, L.: Die Nachhaltigkeitstransformation. In Wollmann, P.; Püringer, R. (Hrsg.) *Die Transformation von Organisationen im öffentlichen und privaten Sektor*. Springer Gabler, Cham, 2024.

[TL23] TRAUTMANN, A.; LECKERQUE, K.: *It & Sustainability – Reifegradindex 2023: Analyse mittelständischer Unternehmen aus Produktion und Logistik in Deutschland*. PAC im Auftrag von Lufthansa Industry Solution, 2023.

[Umw22] UMWELT BUNDESAMT: Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen vor Umbruch. Unter: *Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen vor Umbruch* | Umweltbundesamt. Letzter Zugriff: 13. Juni 2025.

[vBS+12] VOM BROCKE, J.; SEIDEL, S.; RECKER, J.: *Green Business Process Management: Towards the Sustainable Enterprise*. Springer Gabler, Berlin, 2012.

[WHK+23] WENDT, B.; HENKEL, A.; KÖHRSEN, J.; BARTH, T.: Nachhaltigkeit. Soziologie und Nachhaltigkeit, 2023.

[Wie16] WIELAND, J.: „Verfassungsrang für Nachhaltigkeit.“ Zeitschrift für Umweltrecht 9 (2016): 473-483.

[Wun24] WUNDER, T.: Toolbox Strategie und Nachhaltigkeit – Wirksame Methoden für neue Geschäftsmodelle und die Transformation. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 2024.

Autoren

Friederike Dohmann, M. Sc., ist wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung „Digital Transformation“ am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in Paderborn. Dort ist sie in Forschungs- und Industrieprojekten mit einem Fokus auf die strategische Transformationsgestaltung an der Schnittstelle zwischen Nachhaltigkeit und Digitalisierung tätig. Sie studierte International Economics and Management an der Universität Paderborn.

Daniela Hobscheidt, M. Sc., ist Gruppenleiterin der Gruppe „Strategy and Transformation Management“ in der Abteilung „Digital Transformation“ am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in Paderborn. Mit ihrem Team bearbeitet sie schwerpunktmäßig Forschungs- und Industrieprojekte zum Thema Digitale Transformation, insbesondere bei der soziotechnischen Gestaltung von Unternehmen und ihren Prozessen. Sie studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit der Fachrichtung Maschinenbau an der Universität Paderborn.

Gia Vy Vo ist studentische Hilfskraft in der Abteilung „Digital Transformation“ am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in Paderborn. Dort unterstützt sie im Forschungsprojekt Green.OWL und gestaltet so die Nachhaltigkeitstransformation in der Region Ostwestfalen-Lippe (OWL) aktiv mit. Sie studiert International Business Studies an der Universität Paderborn.

Christian Kürpick, M. Sc., leitet die Abteilung „Digital Transformation“ am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM in Paderborn. Mit seinem Team bearbeitet er schwerpunktmäßig Forschungs- und Industrieprojekte zur strategischen Transformationsplanung von Unternehmen in der Schnittstelle zwischen der Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Er studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit der Fachrichtung Maschinenbau an der Universität Paderborn.

Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu ist Direktor am Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM und Leiter der Fachgruppe Advanced Systems Engineering am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Produktentstehung intelligenter technischer Systeme. In Personalunion ist Prof. Dumitrescu Geschäftsführer des Technologienetzwerks Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe (it's OWL).

Mobilität der Zukunft: Erfolgsfaktoren zur Integration autonomer Shuttles in den ÖPNV

Martin Feldwieser¹, Cansu Yapıcı¹, Philipp Ciziroglou¹,

¹ *Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, martin.feldwieser@iao.fraunhofer.de, cansu.yapici@iao.fraunhofer.de, philipp.ciziroglou@iao.fraunhofer.de,*

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit dokumentiert die Ergebnisse aus der dritten Projektphase des Reallabors AMEISE, das sich mit der Einführung und Skalierung autonomer Shuttles im ÖPNV beschäftigt. Der Beitrag versteht sich als praxisnahe Reflexion eines laufenden Forschungsprojekts zur Identifikation und Analyse von Erfolgsfaktoren. Auf Basis einer Kombination von Cross-Impact-Analyse, Reallaborerfahrungen und Expertenvalidierung werden zentrale Transformationsfelder und Erfolgsfaktoren identifiziert, die für die Integration autonomer Systeme in urbane Mobilitätskonzepte relevant sind. Diese Felder dienen als strukturierende Orientierung für Städte und Ministerien und liefern praxisorientierte Handlungsempfehlungen zur Unterstützung kommunaler und überregionaler Umsetzungsprozesse im Kontext der Verkehrswende.

Schlüsselworte

Autonomer ÖPNV, Mobilitätswende, Transformationspfade, Zukunftsforschung

Mobility of the Future: Success Factors for the Integration of autonomous Shuttles into Public Transport

Abstract

This paper documents the results from the third project phase of the AMEISE real-world laboratory, which is investigating the introduction and scaling of autonomous shuttles in public transport. This article is intended as a practical reflection of an ongoing research project aimed at identifying and analyzing success factors. Based on a combination of cross-impact analysis, real-world laboratory experience, and expert validation, key transformation fields relevant to the integration of autonomous systems into urban mobility concepts are identified. These fields serve as a structuring guide for cities and ministries and provide practical recommendations for action to support municipal and supra-regional implementation processes in the context of the transport transition.

Keywords

Autonomous Public Transport, Mobility Transition, Transformation Pathways, Foresight

1 Ausgangssituation und Forschungsfrage

Gesellschaftliche Megatrends wie Klimawandel, Urbanisierung, demografischer Wandel und Digitalisierung verändern das Mobilitätsverhalten in einem bislang unbekannten Tempo und Ausmaß. Der Verkehrssektor steht dabei im Zentrum der Transformation: Er ist einer der größten Verursacher von Treibhausgasemissionen und zugleich ein zentraler Hebel für eine nachhaltige Entwicklung. Baden-Württemberg hat sich ambitionierte Ziele gesetzt, um bis 2040 klimaneutral zu werden. Bis 2030 sollen die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen im Vergleich zu 1990 um 55 Prozent reduziert werden [VM-BW23].

Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) nimmt in diesem Prozess eine Schlüsselrolle ein. Ziel ist es, Mobilitätsangebote effizienter, nachhaltiger und gleichzeitig sozial inklusiver zu gestalten [eMO25]. Besonders autonome Shuttles gelten in diesem Zusammenhang als vielversprechendes Instrument. Sie eröffnen die Möglichkeit, den ÖPNV flexibler und ressourcenschonender zu gestalten, indem sie etwa Randlagen erschließen, in verkehrsschwachen Zeiten ein bedarfsgerechtes Angebot bereitstellen oder die erste und letzte Meile abdecken. Darüber hinaus können sie die steigende Knappheit an Fahrpersonal abfedern und durch emissionsfreie Antriebe einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasen leisten.

Technologisch haben sich automatisierte Fahrzeugsysteme in den vergangenen Jahren rasant weiterentwickelt. Systeme der Automatisierungsstufen SAE Level 3 und 4 werden derzeit in mehreren internationalen Pilotprojekten getestet – insbesondere im Kontext des ÖPNV, wo sich definierte Routen, geringe Geschwindigkeiten und begrenzte Einsatzräume als günstig erweisen [SAE21]. In Deutschland wurden mit Reallaboren wie HEAT in Hamburg [DLR25] oder dem Projekt „SAVeNoW“ in Niedersachsen erste erfolgreiche Feldversuche durchgeführt, in denen autonome Kleinbusse im öffentlichen Straßenraum erprobt wurden [LHD22].

Trotz dieser Potenziale bestehen erhebliche Herausforderungen. Während die technischen Grundlagen – etwa Sensorik, Regelungstechnik und IT-Sicherheit – in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht haben, ist die organisatorische, planerische und betriebliche Integration in bestehende urbane Mobilitätssysteme weit weniger geklärt. Fragen nach der Einbindung in Verkehrsverbünde, der interkommunalen Kooperation, der Integration in digitale Datenplattformen oder der gesellschaftlichen Akzeptanz sind bislang nur unzureichend beantwortet. Hier zeigt sich eine deutliche Forschungslücke: Die technologische Machbarkeit ist vielfach bewiesen, die Skalierbarkeit und systemische Einbettung dagegen bleiben eine zentrale Herausforderung.

Vor diesem Hintergrund setzt das Forschungsprojekt AMEISE (Autonomer Mobilitätsbetrieb für eine integrierte Stadt- und Energieentwicklung) an. In den Phasen I und II wurden die technischen und betrieblichen Voraussetzungen für einen emissionsfreien, autonomen Shuttle-Betrieb erprobt und validiert – unter anderem in Waiblingen mit einer realen Linienanbindung an den ÖPNV. In Phase III liegt der Schwerpunkt auf der stadtplanerischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Skalierung sowie der datenbasierten Integration autonomer Mobilität in Quartiersentwicklungsprozesse. Damit bietet AMEISE ein praxisnahes Umfeld, um Erfolgsfaktoren

und Hemmnisse bei der Implementierung autonomer Shuttles zu identifizieren und in Transformationspfade für die Verkehrswende zu überführen. Aus diesem Grund widmet sich der vorliegende Beitrag der Beantwortung der Forschungsfrage:

Welche praxisnahen Erfolgsfaktoren und Hemmnisse bei der Einführung autonomer Shuttles mit Fokus auf organisatorische, planerische und betriebliche Integration in urbane Systeme konnten im Projekt AMEISE 3.1 identifiziert werden, und wie lassen sich diese in Transformationspfade für die Integration autonomer Shuttles im ÖPNV überführen?

Ziel ist es auf Basis aktueller empirischer Projekte (v. a. AMEISE), existierender Literatur sowie eigener Auswertungen ein konsistentes Set an Erfolgsfaktoren zu bestimmen und damit einen Beitrag zur systematischen Operationalisierung der Mobilitätswende im ÖPNV zu leisten.

2 Methodische Grundlagen

Im Rahmen der dritten Projektphase von AMEISE (3.1) wurde ein vollständiges Betriebskonzept für eine autonome Shuttleverbindung in Ehningen entwickelt. Ziel war es, ein realistisches Szenario für die Integration eines SAE-Level-4-Shuttles in den bestehenden ÖPNV zu schaffen – unter besonderer Berücksichtigung von Barrierefreiheit, Nutzerbedürfnissen und betrieblichen Anforderungen. Die Konzeption umfasste unter anderem die detaillierte Routenplanung, eine abgestimmte Infrastrukturstrategie (inkl. Haltestellen und Ladepunkten), eine vollständige Betriebsdokumentation zur Vorbereitung einer Zulassung nach AFGBV sowie der Pilotbetrieb eines autonomen Shuttles.

Dabei wurde ein methodisches Vorgehen entwickelt und angewendet, das sich durch eine gesamtsystemische Betrachtungsweise sowie durch anwendungsorientierte Erhebungs- und Erprobungsformate auszeichnet. Diese Kombination erwies sich als besonders geeignet für urbane Transformationsprozesse, die durch eine hohe Innovationsdynamik, komplexe Akteurslandschaften und wechselnde Rahmenbedingungen geprägt sind. Im Rahmen einer umfassenden Ist-Analyse wurden zunächst urbane Wirkungsgefüge untersucht, wobei die Wechselwirkungen zwischen autonomen Fahrzeugen und städtischer Infrastruktur analysiert wurden. Zudem wurden innovative Konzepte zur Integration autonomer Shuttles in bestehende Verkehrssysteme entwickelt, insbesondere durch die Identifizierung von relevanten Datenpotenzialen und die Optimierung von Serviceprozessen. Besondere Berücksichtigung fand auch die Nutzerakzeptanz sowie Barrierefreiheit. Workshops und Expertengespräche dienten der Feinabstimmung und der Sicherstellung, dass alle relevanten Faktoren für die Skalierung beachtet wurden. Ein herausragendes Merkmal dieser Methodik ist der interdisziplinäre Ansatz, der sowohl technische, stadtplanerische als auch soziale Perspektiven integriert. Durch die enge Zusammenarbeit mit Stakeholdern, kommunalen Vertretern und Experten in Form eines integrierten Think Tanks werden Herausforderungen frühzeitig identifiziert und Lösungen entwickelt, die den langfristigen Erfolg autonomer ÖPNV-Lösungen sicherstellen [AME25].

Die besondere Innovationskraft des Ansatzes liegt in der engen Verzahnung von vorausschauender Szenariotechnik, praxisbasierter Realraumerprobung, Experten geleiteter Validierung,

technologiegestützter Datenanalyse sowie der systemischen Verknüpfung von urbaner Planung, Mobilitätstechnologien und Governance-Strukturen.

2.1 Zukunftsorientierte Systemanalyse

Ausgangspunkt des Projekts war die methodische Anwendung bewährter Teilschritte der Szenariotechnik nach Ute von Reibnitz [REI92], insbesondere die strukturierte Erhebung von Einflussfaktoren, die Erschließung von urbanen Wirkungsgefügen sowie die Anwendung der Cross-Impact-Analyse [WJ10] zur Identifikation aktiver Hebel und Wechselwirkungen. Hierbei wurde ermittelt, wie stark jeder Einflussbereich, charakterisiert durch seine markantesten Einflussfaktoren, die anderen Bereiche beeinflusst. Somit ließen sich besonders aktive, mittelstarke und passive Einflussfaktoren bestimmen. Die Methode eignet sich insbesondere für Szenarien mit hoher Komplexität und begrenzter Datenlage, da sie qualitative Einschätzungen in eine nachvollziehbare Systematik überführt.

Jeder Einflussfaktor wurde im Rahmen eines **Cross-Impact-Verfahrens** [REI92], hinsichtlich seiner Wirkung auf andere Systemelemente bewertet. Die Bewertung erfolgte auf einer dreistufigen Skala (0 = kein Einfluss, 1 = geringer Einfluss, 2 = starker Einfluss), um Unsicherheiten bei der qualitativen Einschätzung zu minimieren. Daraus wurden **Aktiv- und Passiv-Summen** berechnet, die Auskunft darüber geben, ob ein Systemelement tendenziell eher als Treiber (aktiv), Betroffener (passiv), ambivalent oder puffernd im Gesamtsystem wirkt. Zur Visualisierung der Systemdynamik wurde das Ergebnis in ein **System-Grid** übertragen, das die Einflussfaktoren in vier Quadranten einteilt: aktive, ambivalente, puffernde und passive Elemente. Diese Einteilung ermöglicht eine gezielte Ableitung strategischer Handlungsschwerpunkte, etwa durch die Fokussierung auf hochaktive Elemente mit besonderem Hebelpotenzial für Transformationen im Mobilitätssystem.

Die Methode erwies sich insbesondere im Umgang mit interdisziplinären Einflussfaktoren – etwa im Zusammenspiel von Technologie, Regulierung, Nutzerakzeptanz und Infrastrukturbereitstellung – als praktikabel und strukturierend. Durch diese Methode können übergeordnete Einflussbereiche identifiziert, und deren Folgewirkung für den Untersuchungsbereich abgeleitet werden. Dieser analytische Zugang ermöglichte es, nicht nur technologische Trends, sondern auch planerische, gesellschaftliche und politische Einflussgrößen systematisch zu erfassen und zu gewichten. Als Ergebnis wurde ein konsistentes Wirkungsgefüge erschlossen, aus dem weiterführende Handlungsempfehlungen für den Transformationsprozess abgeleitet wurden.

2.2 Reallaborlogik als Innovationskatalysator

Was diesen Ansatz besonders macht, ist die konsequente Verknüpfung der theoretisch-analytischen Ebene mit einem realweltlichen Reallaboransatz.

Reallabore gelten in der aktuellen Transformationsforschung als besonders geeignete Methode, um komplexe Innovationsvorhaben unter realen Bedingungen zu erproben [MER21]. Sie ermöglichen es, technische, soziale und organisatorische Innovationen in einem konkreten räum-

lich-institutionellen Kontext gemeinsam mit relevanten Akteuren zu entwickeln und zu evaluieren. Dadurch lassen sich nicht nur technologische Machbarkeiten prüfen, sondern auch soziale Akzeptanz, Governance-Strukturen und betriebliche Rahmenbedingungen iterativ gestalten. Der Reallaboransatz fördert somit das Lernen im Tun („learning by doing“) und schafft belastbare Erkenntnisse für Skalierung und Systemintegration. Besonders im Bereich nachhaltiger Mobilität ermöglichen Reallabore die praxisnahe Kombination von Technik- und Gesellschaftsperspektiven und gelten als Brückeninstanz zwischen Forschung, Politik und Zivilgesellschaft [BMW19].

Somit beschränkte sich das Projekt nicht auf hypothetische Handlungsempfehlungen, sondern testete diese unmittelbar im Realbetrieb: Dazu zählten die Auswahl realer Teststrecken, die Durchführung von Zulassungsprozessen über das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) sowie der betriebstechnische Einsatz eines L4-Shuttles auf dem auf dem Bertrandt Betriebsgelände in Ehningen. Dies ermöglichte eine realitätsnahe Überprüfung von Annahmen, eine iterative Anpassung der Strategie sowie den Aufbau praxisnaher Erfahrungswerte.

2.3 Validierung durch einen interdisziplinären Expertenbeirat

Ein zentrales Qualitätsmerkmal des Projekts war die Einbindung eines hochkarätig besetzten Expertenbeirats, der als strategische Politikberatungsinstanz fungierte. Der Beirat vereinte Perspektiven aus Wissenschaft, Kommunalverwaltung, Technologieentwicklung, Verkehrsplanung und Gesellschaft. Durch regelmäßige Reflexionsschleifen konnte das Projekt nicht nur aktuelle Entwicklungen adaptiv integrieren, sondern auch unterschiedliche Sichtweisen zusammenführen, priorisieren und in konkrete Handlungspfade überführen. Diese partizipative Validierungsstruktur stärkte die Legitimität der Ergebnisse und sicherte deren Anschlussfähigkeit an unterschiedliche politische und fachliche Kontexte [AME25].

Expertenbeiräte übernehmen in der Politik- und Innovationsforschung eine zentrale Vermittlungsfunktion zwischen Wissenschaft, Verwaltung und Praxis. Diese Form der „institutionalisierten Politikberatung“ [MAY06] trägt dazu bei, wissenschaftlich fundiertes Wissen in politische Entscheidungsprozesse zu überführen, komplexe Herausforderungen systematisch aufzubereiten und durch die Entwicklung von Szenarien, Bewertungen und Handlungsempfehlungen strategische Orientierungen bereitzustellen. Ihre Unabhängigkeit von Interessensvertretungen sowie die interdisziplinäre Zusammensetzung ermöglichen es ihnen, Transformationsprozesse kritisch-reflexiv zu begleiten und die Qualität langfristiger Entscheidungsfindung zu verbessern. Insbesondere im Kontext technikgetriebener gesellschaftlicher Neuerungen – wie dem autonomen ÖPNV – bieten Expertenbeiräte geschützte Foren für evidenzbasierte, disziplinübergreifende und zukunftsgerichtete Aushandlungen. Damit leisten sie einen wichtigen Beitrag zur gesellschaftlichen Anschlussfähigkeit und operativen Umsetzung solcher Innovationen.

2.4 Systemische Verknüpfung von Stadtplanung und Technologiemanagement

Besonders zielführend war die methodische Integration der Dimensionen „Stadtsystemgestaltung“ und „Technologiemanagement“. Das autonome Shuttle wurde nicht als singuläre technologische Innovation betrachtet, sondern als ein disruptives Element innerhalb eines komplexen urbanen Gefüges. Diese Perspektive ermöglicht es, Abhängigkeiten und Spannungsfelder – etwa zwischen Flächenverfügbarkeit, straßenverkehrsrechtlichen Rahmenbedingungen, Infrastrukturplanung, Betriebskonzepten und Nutzererwartungen – frühzeitig zu identifizieren und gezielt zu adressieren. Durch die Kopplung an digitale Planungsinstrumente wie den Digitalen Zwilling und durch die Einbindung räumlicher Daten (POIs, Verkehrsbelastung, Infrastrukturzustände, Nutzergruppenprofile) konnte eine neue Qualität der evidenzbasierten Mobilitätsplanung erreicht werden. Gleichzeitig wurden auch institutionelle Fragen – etwa die Rolle der öffentlichen Hand, Genehmigungsverfahren, Leitstellenkonzepte, Datenhoheit – strukturiert analysiert und in interdisziplinäre Transformationspfade und Handlungsempfehlungen überführt [AME25].

2.5 Transformationspfade als strategisches Orientierungsinstrument

In der Transformations- und Nachhaltigkeitsforschung werden Transformationspfade als strukturierte Abfolgen gesellschaftlicher, institutioneller und technischer Veränderungen verstanden, die notwendig sind, um von einem gegenwärtigen Zustand zu einem normativ gesetzten Zielzustand zu gelangen. Sie beschreiben nicht nur Endziele, sondern fokussieren auf konkrete Übergangsprozesse, einschließlich der dabei beteiligten Akteure, Technologien, politischen Rahmenbedingungen und sozialen Praktiken [WBGU11]. In ihrer Anwendung dienen Transformationspfade dazu, die Erfolgsfaktoren einzubetten, komplexe Zukunftsherausforderungen strategisch zu strukturieren, Handlungsoptionen aufzuzeigen und Pfadabhängigkeiten sichtbar zu machen.

Der methodische Zugang mündete in der Entwicklung und Formulierung praxisorientierter Transformationspfade für die Integration autonomer Shuttles in den ÖPNV, die – basierend auf empirischen Daten, Erprobungsergebnissen und Experteneinschätzungen – konkrete Entwicklungsschritte, Akteurskonstellationen und regulatorische Anforderungen beschreiben. Diese Pfade dienen nicht nur als Orientierungsrahmen für politische Entscheidungsträger, Kommunen und Verkehrsunternehmen, sondern eröffnen auch neue Perspektiven für strategische Investitionen, institutionellen Wandel und innovationsfördernde Marktentwicklung.

Die Transformationspfade umfassen sowohl technische und planerische Handlungsfelder – etwa Streckenauswahl, Haltepunkte, Ladeinfrastruktur, Datenintegration – als auch organisatorische und institutionelle Dimensionen, etwa Zuständigkeitsklärung, Genehmigungslogiken, Personalentwicklung, Bürgerbeteiligung und Finanzierungsmodelle [AME25].

3 Ergebnisse

Die nachfolgenden Ergebnisse basieren auf einer methodischen Kombination aus strukturierter Systemanalyse, realweltlicher Erprobung und interdisziplinärer Expertise. Ziel ist es, die Einführung autonomer Shuttles nicht isoliert als technologische Innovation zu betrachten, sondern eingebettet in bestehende urbane Strukturen sowie unter Berücksichtigung institutioneller, planerischer und betrieblicher Rahmenbedingungen. Die Verbindung aus theoretisch-analytischen Verfahren und praxisnaher Validierung ermöglicht eine differenzierte Betrachtung relevanter Einfluss- und Erfolgsfaktoren.

Die Cross-Impact-Analyse zur Integration autonomer Busse in städtische Verkehrssysteme folgte drei Phasen. Zunächst wurden durch ein breites Literatur-Scoping [WJ10] und internes Brainstorming 38 Rohfaktoren ermittelt, die nach Plausibilisierung auf 23 verdichtet und in einer Cross-Impact-Matrix positioniert wurden. Ergebnis: sechs aktive (z. B. Rechtsrahmen, Förderpolitik), acht passive, fünf kritische (u. a. Daten-/IT-Infrastruktur, Nutzerakzeptanz) und vier träge Faktoren. Anschließend sicherte eine Stakeholder-Analyse die Perspektiven von Kommunen, Verkehrs-unternehmen, Bürger*innen und Umweltverbänden. Ein Experten-workshop vertiefte die Ergebnisse: Die Teilnehmenden bewerteten die Anpassungsdauern (≤ 3 , ≤ 5 , ≥ 10 Jahre) und priorisierten sieben Schlüsselfaktoren: Rechtsrahmen, kommunale Klimaziele, Finanzierung/Wirtschaftlichkeit, Daten- und IT-Infrastruktur, öffentliche Akzeptanz/Sicherheit, Verfügbarkeit autonomer Fahrzeugtechnik, Fachkräfte/Change-Management.

Auf dieser, durch die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der Literatur erarbeiteten und vom Expertenbeirat validierten, Grundlage wurden alle zentralen Einflussfaktoren der Cross-Impact-Analyse (im Feld „kritisch“ des System Grids) zu **fünf** übergeordneten, thematischen **Transformationsfeldern** zusammengefasst, aus denen unterschiedliche Handlungsempfehlungen im Sinne von Transformationspfaden abgeleitet wurden. Dabei wurde berücksichtigt, welche Faktoren als besonders konsistenzstark, beeinflussbar und systemprägend gelten. Zusätzlich zu den entwickelt Handlungsempfehlungen wurden auch hemmende Faktoren bzw. Hürden identifiziert, die bei der Umsetzung der jeweiligen Handlungsempfehlungen beachtet werden müssen.

Nachfolgend werden die fünf Transformationsfelder mit den identifizierten Erfolgsfaktoren und Hürden dargestellt.

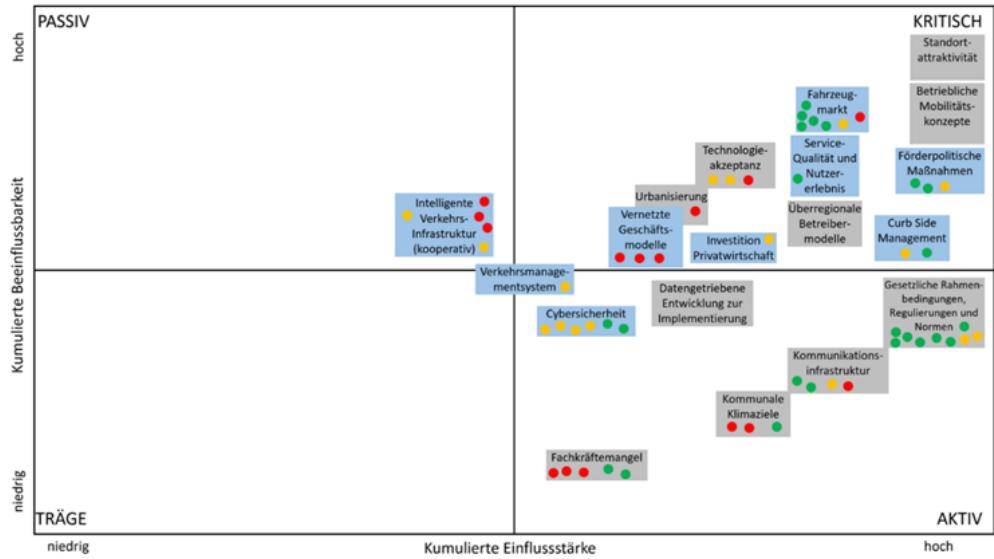


Bild 1: Durch Expertenbeirat bewertete System-Grids mit den je wichtigsten Einflussfaktoren im Feld "kritisch" (eigene Darstellung)

3.1 Transformationsfeld „Stadt- und Quartiersplanung“

Im Bereich der Stadt- und Quartiersplanung (1) wurde deutlich, dass autonome Shuttles neue Anforderungen an die städtische Infrastruktur stellen. Notwendig sind geeignete Haltepunkte, Ladeinfrastruktur sowie Betriebshöfe, die im bestehenden Stadtraum integriert werden müssen. Durch die Entlastung des Individualverkehrs können neue Flächenpotenziale für Mobilitätsangebote, Klimaanpassung oder Wohnraum erschlossen werden. Gleichzeitig erfordert die erfolgreiche Einführung autonomer Systeme eine enge Zusammenarbeit unterschiedlichster Akteure – von Verkehrsplanung über Fahrzeughersteller bis hin zur kommunalen Verwaltung. Um diese komplexen Prozesse zu koordinieren, wird die Einrichtung einer übergeordneten Beratungs- und Koordinationsstelle empfohlen, die Kommunen bei Streckenauswahl, Genehmigungsverfahren, Barrierefreiheit und Stakeholdermanagement unterstützt. Darüber hinaus sollten die Technologien frühzeitig in die Stadt- und Verkehrsplanung eingebunden werden, insbesondere bei Neubauprojekten und langfristiger Quartiersentwicklung. Ziel ist es, den autonomen ÖPNV nicht isoliert, sondern als Teil eines vernetzten Mobilitätssystems zu denken, das bestehende Angebote sinnvoll ergänzt [AME25].

Ein zentrales Hindernis für die zügige Einführung autonomer Mobilitätslösungen sind die langen Planungs- und Innovationszyklen im Infrastrukturbereich. Der Umbau urbaner Räume, etwa durch die Schaffung geeigneter Lade-, Halte- und Wendeanlagen, dauert oft viele Jahre und kann mit dem technologischen Innovationszyklus nicht Schritt halten. Zusätzlich erschweren langwierige Abstimmungsprozesse zwischen Verwaltung, Verkehrsunternehmen und privaten Partnern die Umsetzung. Daher bedarf es neuer Strategien zur Technikfolgenabschätzung und zur frühzeitigen Integration autonomer Systeme in kommunale Planungsprozesse. Digitale Werkzeuge wie „Digitale Zwillinge“ und virtuelle Streckensimulationen könnten dabei helfen, infrastrukturelle Anforderungen schon in frühen Planungsphasen praxisnah abzubilden [AME25].

3.2 Transformationsfeld „Wertschöpfungs- und Datenpotenziale“

Im Transformationsfeld Wertschöpfungs- und Datenpotenziale (2) wurde das Potenzial digitaler Technologien besonders hervorgehoben. Der Einsatz von digitalen Zwillingen, virtuellen Planungsinstrumenten und hochpräziser Umfelderfassung kann die Effizienz und Qualität der Streckenplanung signifikant verbessern. Gleichzeitig ist die dezentrale und uneinheitliche Datenlage derzeit ein zentrales Hindernis. Um die Planung und Umsetzung autonomer Mobilitätslösungen zu unterstützen, braucht es eine klare Daten-Governance, zentrale Plattformen, einheitliche Standards und vertrauenswürdige Datentreuhandmodelle. Darüber hinaus ergeben sich aus dem Betrieb autonomer Shuttles neue Möglichkeiten der Wertschöpfung: Fahrzeugdaten können für Wartung, Verkehrsplanung oder urbane Logistik genutzt werden. In Zusammenarbeit mit der Immobilienwirtschaft lassen sich etwa Quartierskonzepte mit reduziertem Parkplatzbedarf realisieren, was finanzielle und planerische Freiräume für nachhaltige Mobilität schafft. Autonome Shuttles könnten zudem gezielt in touristischen und kommerziellen Kontexten eingesetzt werden – beispielsweise zur Anbindung von Einkaufszentren, Resorts oder autofreien Innenstädten. Auch als mobile Nahversorgungs- oder Lieferlösungen – etwa in ländlichen Räumen – eröffnen sich neue Geschäftsmodelle. Zur Ausschöpfung dieser Potenziale wird der Aufbau digitaler Schnittstellen sowie die Förderung von Public-Private-Partnerships empfohlen [AME25].

Eine zentrale Erkenntnis des Projekts: Autonome Shuttles sind zunächst kein Ersatz für den bestehenden ÖPNV, sondern ein ergänzendes Element im Mobilitätsökosystem. Ihr größter Nutzen entsteht mittelfristig dort, wo konventionelle Systeme an ihre Grenzen stoßen – etwa in dünn besiedelten Räumen, bei der Erschließung der ersten und letzten Meile oder in Randzeiten mit geringem Fahrgastaufkommen. Auch in verkehrsberuhigten Innenstadtkonzepten bieten autonome Systeme neue Möglichkeiten zur bedarfsoorientierten, leisen und emissionsfreien Erschließung. Aus wirtschaftlicher Perspektive stellen autonome ÖPNV-Systeme eine große Investition dar, deren Kosten sich in der Startphase nicht allein durch Fahrgeldeinnahmen decken lassen. Die Erschließung datenbasierter Wertschöpfungspotenziale bietet hier neue Ansätze: Echtzeitdaten aus Fahrzeugen können zur intelligenten Routenoptimierung, zur Zustandserfassung von Straßeninfrastruktur oder zur urbanen Logistik beitragen. Besonders im Zusammenspiel mit Immobilieneigentümern, dem Einzelhandel oder touristischen Einrichtungen eröffnen sich neue Geschäftsmodelle – von der Reduktion des Stellplatzschlüssels bei Bauvorhaben bis zur Vernetzung mit City-Logistik- oder Serviceplattformen. Voraussetzung ist jedoch ein konsistentes Datenmanagement. Die Etablierung einer sektorübergreifenden Daten-Governance – etwa durch kommunale Datentreuhänder – wird damit zur zentralen Voraussetzung für Effizienz, Vertrauen und Skalierbarkeit [AME25].

3.3 Transformationsfeld „Fahrzeugbeschaffung und -zulassung“

Ein weiteres wesentliches Transformationsfeld betrifft die **Fahrzeugbeschaffung und -zulassung (3)**. Die aktuellen Genehmigungsverfahren über das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) sind komplex, aufwendig und intransparent. Besonders fehlt es Antragstellenden an Planbarkeit hinsichtlich Kosten, Zeitrahmen und Erfolgsaussichten. Deshalb wird empfohlen, standardisierte Referenzmodelle für den Zulassungsprozess zu entwickeln, die sowohl Verfahrensschritte als

auch Zuständigkeiten klar abbilden. Begleitend könnten Fallbeispiele und ein systematisches Feedbacksystem dabei helfen, Genehmigungsprozesse zu vereinfachen und zu beschleunigen. Darüber hinaus sollte die geltende Verordnung zur Genehmigung und zum Betrieb autonomer Fahrzeuge (AFGBV) dahingehend erweitert werden, dass neben Fahrzeugherstellern auch Forschungseinrichtungen, Verkehrsunternehmen und Städte als Antragsteller fungieren können. Nur so lassen sich innovative Betriebskonzepte umfassend erproben. Parallel dazu besteht Handlungsbedarf in der aktiven Marktentwicklung: Derzeit sind zu wenige marktreife Fahrzeuge verfügbar, um autonome Systeme im Regelbetrieb flächendeckend zu etablieren. Daher werden staatliche Fördermaßnahmen, vereinfachte Ausschreibungsverfahren und der Aufbau von Leuchtturmprojekten mit entsprechender Flottengröße vorgeschlagen [AME25].

Gerade in Bezug auf Zuständigkeiten, Genehmigungsprozesse und Betriebsmodelle zeigt sich, dass bei vielen Akteuren weiterhin große Unsicherheiten bestehen. Die bestehende Rechtslage – etwa die im Juli 2023 in Kraft getretene AFGBV (Verordnung zum Betrieb von autonomem Fahrzeugen) [AFGBV23] – ist komplex und dynamisch. Der Genehmigungsprozess über das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) ist zeit- und ressourcenintensiv, und Erfahrungswerte fehlen noch weitgehend. Hier bedarf es Referenzprozesse, Planungshilfen und vor allem einer strukturierten Beratung für kommunale und betriebliche Akteure. Eine zentrale, technologieoffene Beratungs- und Transferstelle – etwa als Landesagentur – könnte nicht nur über technische Anforderungen und rechtliche Rahmenbedingungen informieren, sondern auch Best-Practice-Beispiele bereitstellen und bei der Projektinitiierung aktiv begleiten.

Hinsichtlich der Fahrzeugverfügbarkeit zeigt sich ein strukturelles Defizit: Aktuell sind nur wenige Modelle marktreif, zugelassen und für den Dauerbetrieb im ÖPNV geeignet. Die Marktverfügbarkeit autonomer Shuttles ist begrenzt, was Investitionen auf Seiten der Betreiber hemmt. Eine gezielte Marktgestaltung, z. B. über Anschubförderungen, vergaberechtliche Anpassungen und ein abgestimmtes Testfeld-management, könnte hier für Abhilfe sorgen. Öffentliche Leuchtturmprojekte – etwa auf Landes- oder Regionsebene – sollten mit ausreichender Flottengröße ausgestattet sein, um Skalierungseffekte zu erzielen und die Betriebskosten mittelfristig zu senken. Auch die Ausgestaltung von Betreibermodellen steht noch am Anfang. Die Rollen von Verkehrsunternehmen, Technologielieferanten, Kommunen und privaten Partnern müssen neu verhandelt werden. Kommunen benötigen Unterstützung bei der Ausschreibung, beim Aufbau von Wartungsstrukturen und bei der Personalschulung. Gleichzeitig müssen neue Berufsbilder für die Fernüberwachung, für datengestützte Betriebsplanung oder für den Kundenservice im autonomen Fahrzeug entstehen [AME25].

3.4 Transformationsfeld „Leitstellen“

Auch die Einrichtung und der Betrieb von **Leitstellen (4)** spielt eine zentrale Rolle. Leitstellen fungieren als betriebliche Knotenpunkte zur Überwachung und Steuerung autonomer Shuttles und müssen sowohl technisch als auch organisatorisch anspruchsvollen Anforderungen gerecht werden. Bislang existieren jedoch kaum praktische Erprobungen. Daher wird empfohlen, gezielte Reallabore zu schaffen, in denen Leitstellen unter realen Bedingungen getestet werden können. Dabei sollten Aspekte wie Kommunikation, Sicherheit, Zuständigkeiten, Standortwahl und Finanzierungsmodelle systematisch untersucht und standardisiert werden. Zudem ist der

Betrieb solcher Leitstellen auf hochqualifiziertes Fachpersonal angewiesen, was wiederum Schulungs- und Weiterbildungsmaßnahmen sowie attraktive Beschäftigungsbedingungen erforderlich macht. Langfristig sollte eine übergeordnete Instanz etabliert werden, die koordinierend wirkt, Prozesse standardisiert und als technische Schnittstelle zwischen öffentlichen und privaten Akteuren fungiert. Die Entwicklung einer rechtlichen und politischen Vision für die Rolle von Leitstellen – ergänzt durch konkrete Gesetzesvorgaben und Investitionsprogramme – ist ein weiterer Baustein zur erfolgreichen Integration autonomer Systeme in den ÖPNV [AME25].

Ein besonders sensibler und zugleich zentraler Punkt ist der Aufbau von Leitstelleninfrastrukturen. Diese müssen in der Lage sein, eine Vielzahl autonomer Fahrzeuge sicher und effizient zu überwachen, Notfallszenarien zu managen und Schnittstellen zu Fahrgastinformationssystemen sowie Notdiensten zu gewährleisten. Die rechtliche, organisatorische und technische Verortung solcher Leitstellen ist derzeit ungeklärt. Hier braucht es nicht nur technische Standards (z. B. zur Kommunikation mit Fahrzeugen verschiedener Hersteller), sondern auch regulatorische Klarheit, etwa zur Zulassung von Betriebszentralen. Reallabore sollten genutzt werden, um solche Strukturen prototypisch zu erproben. Langfristig könnte eine unabhängige, herstellerneutrale Landesleitstelle zur Bündelung und Standardisierung beitragen [AME25].

3.5 Transformationsfeld „Nutzererlebnis und Barrierefreiheit“

Nutzererlebnis und Barrierefreiheit (5): Mobilität ist ein wesentlicher Bestandteil gesellschaftlicher Teilhabe und spielt eine zentrale Rolle für die Entwicklung einer inklusiven Gesellschaft. Autonom fahrende Fahrzeuge bieten das Potenzial, den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) auszubauen und bedarfsgerechter zu gestalten, wodurch dieser für eine größere Bevölkerungsgruppe zugänglich und attraktiv werden könnte. Dennoch ist Barrierefreiheit im ÖPNV keine Selbstverständlichkeit. Viele Menschen sind in ihrer Mobilität eingeschränkt, weil bestehende Verkehrsmittel, Anlagen und Dienstleistungen nicht auf ihre Bedürfnisse ausgerichtet sind. Hierzu zählen nicht nur Personen mit körperlichen, sensorischen oder geistigen Einschränkungen, sondern auch Fahrgäste mit Kinderwagen, viel Gepäck oder Sprachbarrieren. Barrieren beeinträchtigen nicht nur die individuelle Bewegungsfreiheit, sondern auch soziale Teilhabe und Lebensqualität. Trotz gesetzlicher Vorgaben ist eine vollständig barrierefreie Gestaltung von Mobilitätsangeboten aufgrund ihrer Komplexität und des damit verbundenen finanziellen Aufwands bislang nicht flächendeckend realisiert.

Beim autonomen Fahren entstehen zudem neue Herausforderungen, etwa durch den Wegfall des Fahrpersonals, das bislang Unterstützungsleistungen beim Einstieg erbringt. Dabei stehen unterschiedliche Untersuchungsbereiche im Fokus: Autonome Fahrzeuge müssen barrierefrei gestaltet werden, etwa durch akustische und visuelle Informationssysteme, taktile Bedienelemente, ausreichend Rangierfläche im Innenraum sowie stufenfreie Einstiege mit automatischen Rampen. Haltestellen sollten durch taktile Leitsysteme, kontrastreiche Beschilderung, dynamische Fahrgastinformationen und geeignete Bordsteinhöhen zugänglich gemacht werden. Auch Mobilitätsanbieter sind gefordert, etwa durch barrierefreie Kommunikationswege, alternative Buchungsoptionen, regelmäßige Schulungen und nutzerzentrierte Feedbackprozesse. Digitale

Anwendungen – insbesondere Mobilitäts-Apps – sollten durch intuitive Bedienbarkeit, Sprachausgabe, leichte Sprache und barrierefreie Routeninformationen allen Nutzergruppen gerecht werden. Die Digitalisierung kann als übergreifender Hebel dienen, um physische und digitale Barrieren abzubauen, insbesondere durch frühzeitige, umfassende Information und systematische Nutzerbeteiligung.

Die Erfahrungen aus dem Projekt AMEISE zeigen, dass Barrierefreiheit eine vielschichtige Querschnittsaufgabe entlang der gesamten Reisekette darstellt – von der Fahrzeugkonzeption über Haltestelleninfrastruktur bis hin zu digitalen Anwendungen und Kommunikation mit Leitstellen. Diese Aufgaben betreffen verschiedene Akteure, deren Zusammenspiel im Kontext autonomer Mobilität künftig noch enger koordiniert werden muss. Trotz des Investitionsbedarfs überwiegen langfristig die Vorteile: mehr Selbstständigkeit, höhere Lebensqualität und geringere gesellschaftliche Folgekosten durch eine inklusiv gestaltete Mobilität [AME25].

Die Dimension der Barrierefreiheit stellt einen weiteren bedeutenden Erfolgsfaktor dar. Autonome Shuttles haben das Potenzial, die Teilhabe von Menschen mit Einschränkungen zu verbessern, erfordern dafür aber eine konsequente Gestaltung des gesamten Nutzungserlebnisses – von der Buchung über die Haltestelle bis zum Ein- und Ausstieg. Die Barrierefreiheit darf nicht nachträglich „angepasst“ werden, sondern muss integraler Bestandteil der Entwicklung, der Ausschreibung und der Systemarchitektur sein. Digitale Assistenzsysteme, sprachgesteuerte Buchungsplattformen und infrastrukturelle Anpassungen sind zentrale Hebel. Insgesamt lassen sich die Transformationdimensionen mit ihren Erfolgsfaktoren und Hürden folgendermaßen zusammenfassen:

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Transformationsfeldern, Erfolgsfaktoren und Hürden

Transformationsfeld	Erfolgsfaktoren	Hürden
1. Stadt- & Quartiersplanung	Frühe Integration in Planung, Digitale Zwillinge, Koordinationsstelle	Langsame Zyklen, Abstimmungsbedarf, fehlende Frühintegration
2. Daten & Wertschöpfung	Kommunale Datenplattformen, Datentreuhand, Open-API-Schnittstellen	Fragmentierte Daten, fehlende Standards, Datenschutzunsicherheit
3. Fahrzeug & Zulassung	AFGBV-Öffnung, Referenzverfahren, Förderprogramme	Komplexe Zulassung, begrenzte Fahrzeugverfügbarkeit, Vergabungsunsicherheit
4. Leitstellen & Betrieb	Standardmodelle, Reallabore, Leitstellenqualifikation	Personalmangel, fehlende Vorgaben, rechtlich ungeklärte Betriebsmodelle
5. Nutzererlebnis & Inklusion	Multisensorische Interfaces, barrierefreie Apps, partizipative Entwicklung	Assistenzlücken, digitale Hürden, fehlende Nutzergruppenintegration

4 Diskussion

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass die erfolgreiche Einführung autonomer ÖPNV-Systeme weniger an technischen Grenzen, sondern vorrangig an organisatorischen, planerischen und institutionellen Rahmenbedingungen hängt. Das methodische Vorgehen – insbesondere die Kombination aus Cross-Impact-Analyse, Reallaborlogik und Expertenvalidierung – hat sich als wirkungsvoll erwiesen, um komplexe Systemdynamiken und relevante Einflussfaktoren sichtbar zu machen. Zugleich sind mit dem Design auch gewisse Einschränkungen verbunden, die im Folgenden reflektiert werden.

Ein zentrales Spannungsfeld liegt in der qualitativen Gewichtung der Einflussfaktoren. Trotz eines mehrstufigen Validierungsverfahrens bleibt ein gewisses Maß an Subjektivität bestehen. In dynamischen Feldern wie der autonomen Mobilität können neue Entwicklungen oder Akteurskonstellationen nicht immer vollständig antizipiert werden. Auch Faktoren wie regulatorische Rahmenbedingungen oder technologische Marktverfügbarkeit unterliegen einer gewissen Volatilität, was Anpassungen im Zeitverlauf erfordert kann. Die Reallaborerfahrungen aus Ehningens lieferten belastbare Ergebnisse, sind jedoch kontextgebunden. Ihre Übertragbarkeit auf andere urbane Räume – insbesondere ressourcenschwächere Kommunen – setzt eine differenzierte Betrachtung lokaler Voraussetzungen voraus. Dennoch bieten die erprobten Betriebsmodelle wertvolle Orientierung, sofern sie durch adaptive Strategien flankiert werden.

Auch die Rolle von Governance und Koordination stellt eine zentrale Herausforderung dar. Technologische Standards und rechtliche Grundlagen entwickeln sich zwar weiter (z. B. durch die AFGBV), doch Zuständigkeiten und Kooperationsformate bleiben oft unklar. Die Untersuchung macht deutlich, dass skalierbare Lösungen neue intermediäre Strukturen wie landesweite Koordinierungsstellen oder Datentreuhandmodelle erfordern – jenseits klassischer kommunaler Planungskompetenzen. Hinsichtlich der gesellschaftlichen Anschlussfähigkeit zeigt sich: Aspekte wie Barrierefreiheit und Nutzerzentrierung wurden umfassend berücksichtigt, dennoch bedarf es weiterer Forschung zur Wirkung auf unterschiedliche Bevölkerungsgruppen. Besonders vulnerable Nutzer:innen dürfen durch technologische Innovationen nicht zusätzlich benachteiligt werden. Die inklusive Ausgestaltung – auch in der Kommunikation – muss von Beginn an mitgedacht werden.

Insgesamt verdeutlicht die Diskussion: Die identifizierten Erfolgsfaktoren und Empfehlungen bieten eine tragfähige Grundlage für die Weiterentwicklung autonomer Mobilität. Ihre Umsetzung erfordert jedoch institutionellen Wandel, kontinuierliche Lernprozesse und adaptive Steuerung. Erst das Zusammenspiel von Technik, Governance und Teilhabe macht autonome Mobilität zu einem wirksamen Instrument der Verkehrswende.

Gleichzeitig sind mit diesem Ansatz Einschränkungen verbunden: Die qualitative Gewichtung von Einflussfaktoren ist zwar durch ein Expertengremium validiert, bleibt jedoch immernoch gruppensubjektiv, die empirische Basis ist begrenzt, und internationale Vergleichsperspektiven fehlen bislang. Für eine weitergehende Forschung und Umsetzung sind breitere empirische Grundlagen und Vergleiche mit internationalen Pilotinitiativen erforderlich, um die identifizierten Transformationsfelder systematisch zu bestätigen oder zu erweitern.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Einführung autonomer Shuttles kann einen entscheidenden Impuls für die Weiterentwicklung des öffentlichen Nahverkehrs geben – sie stellt jedoch weit mehr dar als eine technologische Innovation. Ihre erfolgreiche Implementierung setzt tiefgreifende Veränderungen in technischer, organisatorischer und gesellschaftlicher Hinsicht voraus. Die Projektergebnisse aus Phase 3.1 des Forschungsprojekts AMEISE zeigen, aufbauend auf Experteninterviews, Herstellerdialogen und Reallaborerfahrungen, wo methodisch, planerisch und praktisch angesetzt werden kann.

Die zu Beginn gestellte Forschungsfrage:

Welche praxisnahen Erfolgsfaktoren und Hemmnisse bei der Einführung autonomer Shuttles mit Fokus auf organisatorische, planerische und betriebliche Integration in urbane Systeme konnten im Projekt AMEISE 3.1 identifiziert werden, und wie lassen sich diese in Transformationspfade für die Integration autonomer Shuttles im ÖPNV überführen?

konnte mithilfe des geschilderten methodischen Ansatzes beantwortet werden. Die identifizierten Erfolgsfaktoren konnten zusätzlich um hemmende Variablen ergänzt werden.

Damit autonome Mobilität nicht in der Konzeptschublade bleibt, sondern zu einem integralen Bestandteil des öffentlichen Verkehrs wird, braucht es jetzt mehr als punktuelle Pilotprojekte: Erforderlich ist eine **großflächige, überregionale Erprobung mit langfristigem Reallabor-Charakter**, bei der getroffene Annahmen unter realen Betriebsbedingungen systematisch validiert werden können. Dies setzt voraus, dass **Fahrzeugverfügbarkeit, Infrastrukturplanung und Zulassungsbedingungen** so gestaltet werden, dass ein kontinuierlicher Betrieb überhaupt möglich ist – über kommunale Grenzen hinweg.

Das Projekt AMEISE 3.1 zeigt, dass die technische Machbarkeit und die konzeptionelle Betriebsreife gegeben sind – was jedoch fehlt, ist die institutionelle Entschlossenheit, diese Grundlagen in skalierbare und übertragbare Strukturen zu überführen. Denn nur im koordinierten Zusammenspiel von Politik, Praxis und Forschung wird es gelingen, die bestehende Innovationsdynamik in dauerhafte Anwendungen zu überführen. Die nächste Entwicklungsstufe im Skalierungsprozess autonomer Shuttles im ÖPNV erfordert daher nicht nur „mehr Tests“, sondern eine überregional angelegte Betriebsphase, in der kontinuierlich Daten, Nutzererfahrungen und Betriebsszenarien erhoben und zur Verbesserung zurückgespielt werden – als Basis für eine resiliente, inklusive und zukunftsähnliche Mobilität.

Literatur

- [AFGBV23] Bundesministerium Für Digitales Und Verkehr (Bmdv): Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs- und Betriebs-Verordnung (AFGBV) – Verordnung zur Genehmigung und zum Betrieb von Kraftfahrzeugen mit autonomer Fahrfunktion in festgelegten Betriebsbereichen. Berlin, 2023. (https://www.gesetze-im-internet.de/afgbv/_1.html)
- [AME25] Fraunhofer Iao; Stadt Waiblingen; Gemeinde Ehningen: Projekt AMEISE – Transformationspfade für die Integration autonomer Shuttles in den ÖPNV. Abschlussbericht Phase 3.1. Stuttgart, 2025 (In Veröffentlichung).
- [BMWi19] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi): Reallabore als Testräume für Innovation und Regulierung – Ein Leitfaden für Verwaltungen und Unternehmen. Berlin, 2019.

[BRA06] BRAML, J. (2006): Politikberatung amerikanischer Think Tanks. In: Falk, S.; Rehfeld, D.; Römmel, A.; Thunert, M. (Hrsg.) Handbuch Politikberatung. VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-531-90052-0_50

[DLR25] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR): HEAT – Hamburg Electric Autonomous Transportation. Projektbeschreibung, Braunschweig, 2025. (<https://www.dlr.de/de/ts/forschung-und-transfer/projekte/heat>)

[eMO25] BERLINER AGENTUR FÜR ELEKTROMOBILITÄT (eMO): Roadmap zur Implementierung von automatisiertem und vernetztem Fahren im öffentlichen Personennahverkehr in Berlin. KIS’M-Projektbericht, Berlin, 2025.

[FES24] FRIEDRICH-EBERT-STIFTUNG (FES): Wege zur Transformation – Zukunftskompetenzen für die Mobilitäts-, Bau- und Wohnungswirtschaft. FES impuls, Bonn, 2024, S. 1–2.

[LEO23] LEONETTI, E.: Autonomes Fahren im ÖPNV – Zum neuen Rechtsrahmen für autonome öffentliche Verkehrsangebote, den offenen Regulierungsfragen und dem Beitrag zum Klimaschutz. In: Klimaschutz und Städte. Nomos, Baden-Baden, 2023, S. 167–188.

[LHD22] LANDESHAUPTSTADT DÜSSELDORF (LHD): KoMoDnext – Automatisiertes Fahren im digitalen Testfeld Düsseldorf. Schlussbericht des Verbundes. Düsseldorf, 2022.

[MAY06] MAYNTZ, R.: Die Organisation wissenschaftlicher Politikberatung in Deutschland. In: Heidelberg Akademie der Wissenschaften (Hrsg.), Politikberatung in Deutschland. Wiesbaden, 2006, S. 115–122.

[MER21] MEYER, K.; ESCH, D.; RABADJIEVA, M.: Reallabore in Theorie und Praxis: Reflexion des Forschungsdesigns im Hinblick auf die nachhaltige Transformation urbaner Räume. Raumforschung und Raumordnung | Spatial Research and Planning 79 (4), 2021, S. 366–381. <https://doi.org/10.14512/rur.38>

[RAD+19] RIENER, A.; APPEL, A.; DORNER, W.; HUBER, T.; KOLB, J. C.; WAGNER, H. (2019): Autonome Shuttlebusse im ÖPNV. In: Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59406-3>

[REI92] REIBNITZ, U. V.: Szenariotechnik – Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung. Gabler, Wiesbaden, 1992.

[SAE21] SAE INTERNATIONAL: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. J3016_202104. Warrendale, 2021.

[VM-BW23] BADEN-WÜRTTEMBERG MINISTERIUM FÜR VERKEHR: Klimaschutzziele von Baden-Württemberg. Stuttgart, 2023. (<https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/politik-zukunft/nachhaltige-mobilitaet/klimamobilitaetsmonitor/klimaschutzziele-von-baden-wuerttemberg>)

[WBGU11] WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (WBGU): Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. Hauptgutachten. Berlin, 2011.

[WJ10] WEIMER-JEHLE, W.: Cross-Impact Balances: A system-theoretical approach to cross-impact analysis. Technological Forecasting and Social Change 77 (1), 2010, S. 152–162.

Autoren

Martin Feldwieser, M. A., leitet das Competence Team »Data-driven Transformation« am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO). Nach seinem Masterstudium der Elektronischen Medien an der Hochschule der Medien Stuttgart (2014) arbeitete er zunächst im Forschungsfeld Stadtsystem-gestaltung, bevor er 2020 die Teamverantwortung übernahm. In mehr als zehn Jahren am Fraunhofer IAO hat er zahlreiche Smart-City- und Datenökosystem-Projekte initiiert und gesteuert, darunter die BMBF-Leitinitiative »Smart Urban Services«, das landesweite Digitallabor-Programm »Digitalakademie@bw« sowie die Strategieberatung »Di-

gitale Zukunfts-kommunen« für Städte und Landkreise in Baden-Württemberg. Aktuell verantwortet er die Forschungsprojekte »AMEISE – Autonomes Fahren im ÖPNV« und »Smart City Datalabs«, in denen er den prädiktiven Einsatz von Sensorik, IoT-Plattformen und KI-gestützten Datenanalysen zur Entscheidungsunterstützung von Kommunen vorantreibt. Sein methodischer Schwerpunkt liegt auf quantitativ gestützten Szenariotechniken zur systematischen Antizipation künftiger Nutzerbedarfe. Seine Publikationen befassen sich mit Cloud-basierten Kommunallösungen, daten-getriebenen Innovationsräumen und der digitalen Transformation urbaner Akteursnetzwerke.

Cansu Yapıcı ist seit 2022 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO in Stuttgart. Dort leitet sie strategische Digitalisierungsprojekte und gestaltet die digitale Transformation von Städten aktiv mit. Zu ihren Projekten zählen Technologieintegrationen und Smart-City-Initiativen in Stuttgart, Wiesbaden und Konstanz sowie die Entwicklung datenbasierter Digital- und KI-Strategien für Kommunen und Unternehmen. Sie studierte Kommunikations- und Politikwissenschaft mit dem Schwerpunkt auf politischer Kommunikation und internationalen Beziehungen und forscht derzeit zu Transformationspfaden autonomer Mobilität. Ihre journalistische Erfahrung sammelte sie zwischen 2013 und 2016, unter anderem als Reporterin für den öffentlich-rechtlichen Radiosender SWR4.

Philipp Ciziroglou, B.A., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Competence Team »Data-driven Transformation« des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO). Nach seinem Studium der Soziologie und Allgemeinen Rhetorik mit Schwerpunkt Techniksoziologie an der Universität Tübingen arbeitete er als Redakteur am Institut für Arbeitswissenschaften und Technologiemanagement (IAT) der Universität Stuttgart, bevor er 2019 an das Fraunhofer IAO wechselte. Dort leitete er zunächst Projekte im Team »Smart Urban Environments« – unter anderem zur Verwaltungsdigitalisierung (Digitalakademie@bw) sowie ein Innovationsnetzwerk für museale Zukunftsforschung – und verantwortet seit 2024 Technologiefolgenabschätzungen im Bereich autonomes Fahren sowie das landesweite Projekt »Smart City Datalabs Baden-Württemberg«. Parallel dazu lehrt er seit 2019 an der Hochschule Heilbronn im Studiengang Wirtschaftsinformatik das Fach »Praktische Anwendung des Online-Marketings«. Seine Arbeit konzentriert sich darauf, datengetriebene Technologien gesellschaftlich nutzbar zu machen und deren Auswirkungen wissenschaftlich zu bewerten.

Best Paper

Quartiere als urbane Kornkammern und Outside-In-Perspective: Strategische Vorausschau und Potenziale für hyperlokale Lebens- mittelproduktion in zirkulären Stadt systemen

**Steffen Braun¹, Vanessa Borkmann¹, Katharina Dienes¹, Frederic Schubert¹,
Jedrzej Cichocki²**

¹ Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, steffen.braun@iao.fraunhofer.de,
vanessa.borkmann@iao.fraunhofer.de, katharina.dienes@iao.fraunhofer.de,
frederic.schubert@iao.fraunhofer.de

² Kleinblatt GmbH, gf@kleinblatt.de.

Zusammenfassung

Technische Innovationen in der Lebensmittelkonservierung, im Transportwesen und in der Agrarproduktivität haben im 20. Jahrhundert ein globales Lebensmittelversorgungssystem ermöglicht, das größtenteils disjunkt von den Endkonsumenten in urbanen Räumen stattfindet. Doch der Klimawandel und damit verbundene Nachhaltigkeitsbestrebungen, ein sich wandelndes Konsumentenbewusstsein, schwindende Ressourcen, fortschreitende Urbanisierung und sich verschärfende internationale Konflikte stellen dieses System vor extreme Herausforderungen. Nachdem die Industrialisierung die Landwirtschaft aus den Städten verdrängt hat, scheint sich eine Trendwende hyperlokaler Lebensmittelproduktion mit neuen Potenzialen und Technologien anzukündigen: Technologien, die einer urbanen Lebensmittelproduktion zugrunde liegen, entwickeln sich in den letzten Jahren rasant. Die Rückführung von Lebensmittelproduktion in urbane Räume bietet unter anderem Chancen zur Verringerung von Importabhängigkeiten im Kontext globaler Lieferketten und resultierender CO₂-Emissionen, dem Aufbau neuer Wertschöpfungsketten sowie Ansätze zur ökologischen Reaktivierung bisher landwirtschaftlich genutzter Flächen. Am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO befassen sich Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen im Rahmen des Innovationsverbundes »Morgenstadt: Future District Alliance« gemeinsam mit Unternehmenspartnern damit, wie Akteure aus Technologie- und Stadtentwicklung kontrollierte Anbauumgebungen für Lebensmittelproduktion („Controlled Environment Agriculture“) im urbanen Raum einsetzen können und welche räumlich-ökonomischen Potenziale diese bieten. Dabei werden auch sozio-technische Transformationspfade wie Verkehrswende und Kreislaufwirtschaft auf Quartierebene berücksichtigt. Hierzu werden Methoden der strategischen Vorausschau, der Szenariotechnik sowie des Innovationsmanagements für urbane Systeme eingesetzt und neue Erkenntnisse für die zukünftige Kooperation bisher unabhängiger Branchen geschaffen.

Schlüsselworte

Vertikale urbane Landwirtschaft, urbanes Technologiemanagement, Hyperlokale Lebensmittelproduktion, Outside-In-Perspektive

Districts as urban granaries and outside-in-perspective: Strategic foresight and potential for hyperlocal food production in circular urban systems

Abstract

Technical innovations in food preservation, transportation, and agricultural productivity enabled a global food supply system in the 20th century that largely operates disjunctly from end consumers in urban areas. However, climate change and associated sustainability efforts, evolving consumer awareness, dwindling resources, advancing urbanization, and escalating international conflicts pose enormous challenges to this system. After industrialization displaced agriculture from cities, a trend reversal toward hyperlocal food production appears to be emerging with new potentials and technologies: Technologies underlying urban food production have been developing rapidly in recent years. The reintegration of food production into urban spaces offers opportunities to reduce import dependencies in the context of global supply chains and resulting CO₂ emissions, build new value chains, and provide approaches for the ecological reactivation of previously agriculturally used areas.

At Fraunhofer Institute for Industrial Engineering and Organization IAO scientists are investigating, as part of the innovation network "Morgenstadt: Future District Alliance" together with corporate partners, how actors from technology and urban development can plan and deploy controlled environment agriculture for food production in urban spaces and what spatial-economic potentials these offer. This also considers socio-technical transformation pathways such as mobility transition and circular economy at the district level. To this end, methods of strategic foresight, scenario techniques, and innovation management for urban systems are employed, creating new insights for future cooperation between previously independent industries.

Keywords

Vertical urban farming, urban technology management, hyperlocal food production, Outside-In-Perspective

1 Ausgangssituation und Forschungsfrage

Technologisch und historisch betrachtet gab es eine lange Zeit, in der Städte sich unmittelbar von den landwirtschaftlichen Erzeugnissen im Stadtgebiet oder ihrem regionalen Umfeld versorgten. Beispielsweise bauten geschätzte 8.500 selbständige Gärtner noch Mitte des 19. Jahrhunderts auf etwa 1400 Hektar, einem Sechstel der Stadtfläche von Paris, Obst und Gemüse an [CoK12]. Durch technische Innovationen im Bereich der Nahrungsmittelkonservierung (Linde-Verfahren), des Transportwesens (Eisenbahn, LKW, Containerschiff) und der Agrarproduktivität (Grüne Revolution, Massentierhaltung) werden mittlerweile auf einer Gesamtfläche von über fünf Milliarden Hektar (37 Prozent der Landfläche unserer Erde) weltweit Land- und Viehwirtschaft betrieben [Jering, 2019], was sich somit als eigenes globales Versorgungssystem weitestgehend disjunkt von den Endkonsumenten im urbanen Millennium darstellt – mit aktuell fragilen Versorgungsketten und zahlreichen Wandlungstreibern.

Somit wird die Eingangshypothese formuliert, dass ein Paradigmenwechsel für die Zukunft unserer Ernährung im urbanen Zeitalter unvermeidbar ist. Die durchgeführte Studie soll hierzu beitragen, aus technologisch-räumlicher Perspektive eine Reintegration einer urbanen Lebensmittelversorgung im Kontext ausgewählter Quartiersentwicklungen in Erwägung zu ziehen und zukünftige Potenziale in deren Lebenszyklus bis zum Jahr 2050 aufzuzeigen. Es ist davon auszugehen, dass der Handlungsdruck für die Zukunft einer klimaneutralen und urban reintegrierten Lebensmittelversorgung aus zahlreichen Gründen noch zunehmen wird, auch wenn bisher wenig Fachliteratur im Kontext von urbanen Systemen besteht. Zur Eingrenzung des Forschungsbedarfs konnten die folgenden Einflussgrößen für die nachfolgende Methodenauswahl in der Literatur bestimmt werden:

- 1) *Klimawandel*: Die klimatische Erwärmung und zunehmende Extremwetterereignisse verstärken den Druck auf bestehende Monokulturen und großindustrielle Landwirtschaftsformen.
- 2) *Urbanisierung*: Die anhaltende Urbanisierung und globale Bevölkerungsentwicklung bedeuten bis zum Jahr 2050 sowohl eine Verdopplung des Stadtraums als auch des städtischen Lebensmittelbedarfs, also eine Intensivierung und zunehmende Distanz zwischen Lebensmittelherzeugung und -konsum.
- 3) *Globale Transportwege*: Die Reduktion von CO2-Emissionen erfordert im Transportwesen eine Verringerung von nicht-nachhaltigen Transportwegen, vor allem im LKW-Verkehr über lange Strecken.
- 4) *Lebensmittelverschwendungen*: In der bisherigen Wertschöpfungskette von Lebensmitteln kommt ein Drittel nicht bei Endkonsumentin und Endkonsument an, sondern wird für die »Tonne« verschwendet. Dennoch werden umfangreiche Ressourcen dafür verbraucht [WWF, 2017].
- 5) *Klimabilanz des Ernährungssektors*: Der Ernährungssektor spielt eine nicht zu unterschätzende Rolle in der Klimabilanz unserer Gesellschaft: Pro Europäer und Europäerin entstehen bei ganzheitlicher Betrachtung jährlich rund neun Tonnen CO2-Äquivalente [Quarks, 2019].

- 6) *Wiederaufforstung von Anbauflächen*: Würden alle landwirtschaftlichen Nutzflächen weltweit wieder bewaldet werden, könnten etwa 460 Gigatonnen CO₂ aus der Atmosphäre gespeichert werden. Dies wäre möglich, wenn der Flächenbedarf von Agrarflächen gesenkt werden kann [Fuß, 2025].
- 7) *Neues Konsumentenbewusstsein*: Angesichts veränderter Nutzerbedarfe (»Now-Economy«) und klima-bewusster Kundenpräferenzen steigt die Nachfrage nach hyperlokalen Anbaumethoden und online-gestütztem Direktvertrieb.
- 8) *Rückgang Flächenbedarfe*: Strukturwandel, Digitalisierung und neue hybride Arbeitsmodelle erzeugen eine neue Ära klassischer Immobiliennutzungen – mittel- bis langfristig werden strukturell weniger Büroflächen oder auch Parkplätze für MIV in Städten benötigt.
- 9) *Sichere Lieferketten*: Die Ukraine-Krise seit dem Jahr 2022 und deren Rolle als »Kornkammer« Europas hat gezeigt, wie fragil und störanfällig die globalen Lieferketten unserer Lebensmittel sind. Deutschland importierte zuletzt mehr als 60 Prozent seines Gemüses [Statista, 2023b].
- 10) *Wasser als knappe Ressource*: Laut UN wird die Zahl der Menschen, die mit teilweise extremem Wassermangel zu kämpfen haben in Europa bis 2050 um rund 50 Prozent zunehmen. Davon ist konventionelle Landwirtschaft massiv betroffen [WWF, 2022].
- 11) *Technologische Fortschritte*: Durch neue LED-, Kreislauf- und Effizienztechnologien wie Robotik, Sensoren, KI und Nährstoffzufuhrsysteme können Produktionseffizienz und Betriebskosten von kontrollierten Anbausystemen optimiert werden.
- 12) *Intensivierungspraktiken*: Heutige Praktiken der industriellen Landwirtschaft haben zur Folge, dass Biodiversitätsverlust und Bodendegradation in Kauf genommen werden. Laut dem Weltbodenbericht der Vereinten Nationen werden weltweit bis 2050 bis zu 90 Prozent der Böden degradiert sein, was zu einem Verlust von bis zu 50 Prozent der Ernteerträge führen könnte [Sax, 2023].
- 13) *Steigende Lebensmittelpreise*: Klimawandel, Bevölkerungswachstum sowie internationale Konflikte bergen das Risiko, dass Lebensmittelpreise in Zukunft deutlich steigen werden. Beispielsweise wird bis 2050 ein klimawandelbedingter Anstieg der Getreidepreise um bis zu 29 Prozent erwartet [Mbow et al., 2019].
- 14) *Quartiere als Zukunftslabore*: Die erforderliche Transformation von Städten spielt sich maßgeblich auf der Ebene von Stadtteilen oder -quartieren durch Konversion, Umbau oder Nachverdichtung ab. Dabei können neue Technologien frühzeitig in der Planung und Geschäftsmodellierung berücksichtigt werden [Bra23].

Angesicht dieser eingeführten Trends und Prognosen stellt sich somit die Ausgangsfrage, wie und in welchem Umfang urbane Anbausysteme für Lebensmittel in Städte – vor allem auf Ebene neu entstehender Quartiere, Stadtteile, Gewerbegebiete oder Campusse in deutschen Metropolen – helfen können, diese systemischen Herausforderungen zu adressieren. Somit lässt sich die Forschungsfrage wie folgt formulieren:

»Welche technologisch-räumlichen Potenziale urbaner Anbausysteme (controlled environment agriculture) lassen sich im Lebenszyklus beispielhafter Quartiersentwicklungen in Deutschland identifizieren und quantifizieren?«

2 Methodischer Aufbau und Grundlagen

Das methodische Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfrage beruht als Metastudie auf einem komplementären Forschungsdesign von vier miteinander verzahnten Arbeiten, die aufeinander aufbauend in den Jahren 2022 bis 2024 durchgeführt wurden: der explorativen Entwicklung von qualitativen Zukunftsszenarien, der technologisch-räumlichen Typologisierung urbaner Anbausysteme, einer quantitativen Modellierung ihrer Potenziale in beispielhaften Praxisbeispielen sowie einer unternehmensbezogenen Fallstudie eines aktiven AgriTech-Startups.

Bild 1 fasst das methodische Vorgehen der Metastudie zusammen. Sie verdeutlicht die Verzahnung der vier Arbeitsschritte – Szenarioentwicklung, Typologisierung, quantitative Potenzialanalyse und Fallstudie – sowie deren zeitliche Abfolge, wechselseitige Abhängigkeiten und begleitende Querschnittsaktivitäten (Literatur- und Trendanalysen, Expertendialog). Die Grafik stellt damit das komplementäre Forschungsdesign als Gesamtübersicht dar.

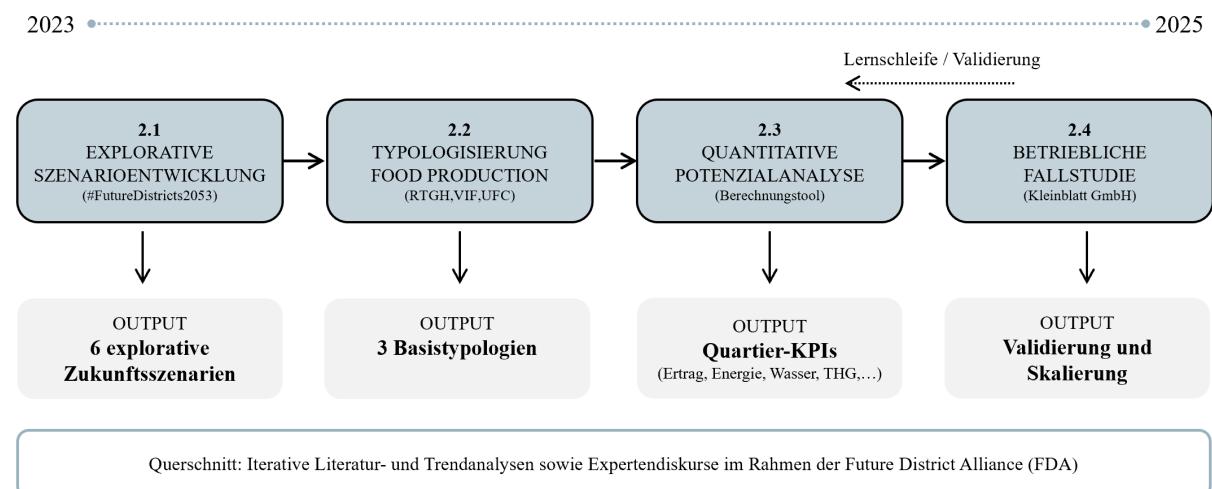


Bild 1: Prozessgrafik des methodisch mehrstufigen Vorgehens (Metastudie)

In ihrer Gesamtheit bilden sie ein konsistentes Gerüst zur systematischen Identifikation und Bewertung urbaner Anbaupotenziale im Quartierskontext und als marktorientierte Outside-In-Perspektive für zukünftige Unternehmen in diesem Feld. Der gewählte Methoden-Mix wurde begleitend durch iterative Literatur- und Trendanalysen sowie den laufenden transdisziplinären Experten-Dialog im Innovationsnetzwerk »Future District Alliance« gestützt [FDA25].

2.1 Explorative Szenarioentwicklung im Rahmen des Innovationsnetzwerkes »Future District Alliance«

Zur Entwicklung explorativer Zukunftsszenarien für urbane Quartierskonzepte bis 2053 wurde von November 2022 bis Mai 2024 ein mehrstufiger, transdisziplinärer Prozess durchgeführt, der qualitative Zukunftsforschung mit partizipativen Formaten und strukturierter Trendanalyse kombinierte. Die Future District Alliance vereint hierzu seit Ende 2022 über 20 Partner aus Stadtentwicklung, Wissenschaft und Wirtschaft, mit dem Ziel, Konzepte für lebenswerte, resiliente und klimaneutrale Quartiere in der Praxis zu realisieren. Der Zeithorizont über 2050 hin-

aus berücksichtigt die hohe Trägheit gebauter Umgebung und die 10-15-jährigen Entwicklungszyklen von Quartieren. Dabei wurden interdisziplinäre Perspektiven gezielt zusammengeführt, um eine fundierte, wissenschaftlich gestützte Basis für die Szenarienentwicklung zu schaffen. Im Fokus stand die Frage: „Welche relevanten Faktoren beeinflussen den Quartierslebenszyklus (Projektierung, Planung, Bau, Betrieb, Konversion) bis 2053 in Deutschland?“

Im ersten Schritt wurden auf Basis einer breiten Literaturrecherche relevante Einflussfaktoren identifiziert und analysiert. Ziel war es, branchenübergreifende Entwicklungen zu erfassen und auf ihre Bedeutung für die Quartiers- und Projektentwicklung zu übertragen. Hierzu wurde ein mehrdimensionale Zukunftslandkarte entwickelt, das zentrale Handlungsfelder systematisch strukturiert. Ergänzt wird das Modell durch die Berücksichtigung möglicher „Black Swans“, also unvorhersehbarer Ereignisse mit disruptivem Potenzial, wie beispielsweise Pandemien oder geopolitische Krisen. Die identifizierten Einflussfaktoren wurden im Rahmen eines eintägigen co-creativen Workshops mit den Partnerunternehmen des Innovationsnetzwerks »Future District Alliance« weiter validiert. Anschließend wurden in einem interdisziplinären, analytischen Prozess auf Basis der Schlüsselfaktoren und vorliegenden Trendanalysen sechs strategische Zukunftsszenarien entwickelt. Zur Anreicherung der Szenarien erfolgte eine systematische Auswertung und Clusterung von über 100 internationalen Good-Practice-Projekten sowie weitere Projektions-Workshops mit externen Expert/innen und Forschungspartner/innen. Diese bilden konsistente, alternative Entwicklungspfade für urbane Quartiere mit neuen Funktionen wie integrierter Lebensmittelproduktion.

2.2 Good-Practice-Analyse zur Typologisierung von Technikansätzen

Auf Basis umfangreicher Good-Practice-Analysen (über 100 Projekte im In- und Ausland) werden zusätzlich auf Basis ausgewählter strategischer Zukunftsszenarien und für die später anschließenden quantitativen Modellierungen methodisch drei Basistypologien für urbane Anbausysteme identifiziert, die sich am heutigen State-of-the-Art und marktgängigen Lösungen hinsichtlich ihrer Kennwerte und Eckdaten orientieren [Bra24] (siehe Bild 2).

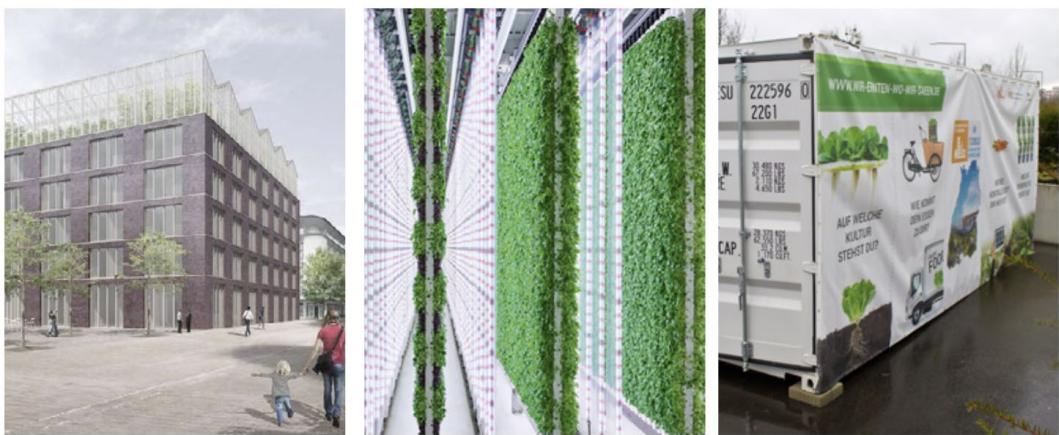


Bild 2: Beispiele untersuchter Technologie-Raum-Module

Sie unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre unterschiedlichen technologisch-räumlichen Einsatzbereiche im Kontext gebauter Umgebung im Innen- und Außenraum. Weitere denkbare Typologien wie monofunktionale und extra für Vertical Farming errichtete Gebäude oder Hallen

(vgl. Aerofarms [Aer24]) wurden nicht betrachtet, da hier keine kaum eine Integrationsfähigkeit in bestehende, eher kleinteilige Stadtstrukturen, besteht.

2.3 Quantitative Potenzialanalyse auf Quartiersebene

Im Rahmen einer vertiefenden Analyse wurden mithilfe eines eigens entwickelten Berechnungstools, das verschiedene anerkannte Bewertungsverfahren aus der jüngeren Fachliteratur sowie aktuelle Metriken zur agrarischen Planung und Optimierung aggregiert, die Zukunftspotenziale urbaner Anbausysteme für ausgewählte Quartiersprojekte der Verbundpartner in Deutschland evaluiert. Das Tool ist über eine benutzerfreundlich gestaltete Excel-Oberfläche (siehe Bild 3) zugänglich, die nach Eingabe weniger standortspezifischer Parameter (Geolokalisierung, Potenzialflächen, Umgebung) anhand standardisierter Kennzahlenformeln die Durchführung präziser, multikriterieller Potenzialanalysen ermöglicht.

Category	Metric	Level	Range	Standard	Data input	Unit	Source
Site-specific metrics	Water cost	high	4,1-6,7	5,80	5,67	l/m ³	Statista
	Electricity cost	medium	3,3-4,0	3,00			
	Electricity cost	low	0,0-0,32	0,15			
	Labor cost (PPP)	high	0,37-0,43	0,39	0,43	l/kWh	Global Petrol Prices
		medium	0,22-0,36	0,21			
		low	0,00-0,21	0,01			
	Emission factor electricity	high	30-45,6	37,80	43,68	l/h	ILO
		medium	17-29,9	23,45			
		low	0,52-16,9	8,71			
	Photovoltaic power output	high	518-800	653,00	345,00	g CO ₂ /l/kWh	Global Change Data Lab
	Solar panel area requirements	medium	268-518	393,00			
	Solar panel area requirements	low	0-267,9	133,95			
	Sales revenue lettuce (excl. VAT)				1137,80	kWh/kWp	Global Solar Atlas
	Net profit margin				7,00	m2/kWp	
	Currency exchange USD				0,94	USD = 1	European Central Bank
	Currency exchange GBP				0,89	GBP = 1	European Central Bank
	Land rate UFC				10,00	l/kg	
	Land rate RTGH				25,00	%	
	Land rate VIF				100,00	l/m ² p.a.	
	Land rate VIF				100,00	l/m ² p.a.	
	Lettuce yields (traditional farming)	high	35,56-78,00	40,29	31,42	t/ha	FAOSTAT
	Lettuce yields (traditional farming)	medium	18,33-35,35	27,21			
	Lettuce yields (traditional farming)	low	0,32-18,32	15,70			
UFC-specific metrics	Delivery distance (UFC set-up)				2000,00	km	
RTGH-specific metrics	System energy consumption				1175,13	l	See tab 'UFC' for ranges
VIF-specific metrics	System energy consumption				3,90	kWh/kg	See list 1 for values
Space availability	Space availability UFC				16,30	kWh/kg	See list 1 for values
	Space availability VIF				500,00	m ²	
	Space availability RTGH				500,00	m ²	

List 1: Energy consumption of OGH, CGH and VIF in different climatic regions in kWh/kg						
	Avg. day °C	Avg. night °C	Avg. sunshine hours/day	kWh/kg CGH	kWh/kg OGH	kWh/kg VIF
Reykjavic region	7,5	2,8	3,4	7,9	8,4	15,6
Stockholm region	9,6	3,7	5,4	7,3	7,2	16
Massachusetts	14,2	5,3	7,2	5,6	3,9	16,3
Tasmania (Australia)	17,0	8,7	6,0	4,5	2,8	16
Tokyo region	18,9	10,0	5,5	5,3	1,9	17,2
Santiago region (Chile)	22,3	7,2	6,4	6,2	2,5	17,3
Gauteng (South Africa)	21,8	10,6	8,5	5,8	1,0	17,5
Maricopa county (Phoenix, I	23,3	11,9	10,2	8,2	4,3	18,9
Singapore	31,0	23,7	5,6	9,4	6,0	20,4
UAE	32,7	20,6	9,2	10,5	7,7	20,1

Climate data from: <https://www.klimatabelle.de/>

Bild 3: Benutzeroberfläche und Inputfaktoren des Berechnungstools [Hab22].

Diese berücksichtigen dabei als Grundlage die drei im vorherigen Schritt eingeführten Typologien urbaner Anbausysteme – Dachgewächshäuser (Typ 1), vertikale Indoor-Farmen (Typ 2) und Urban-Farming-Container (Typ 3) – und erlauben eine ortsgenaue Marktabschätzung zentraler Leistungsindikatoren, beispielsweise der potenziellen Bruttoproduktion (Ertrag) oder des zu erwartenden Energieverbrauchs [Hab22].

Ein wesentlicher Aspekt des Berechnungstools besteht in der Möglichkeit, veränderliche Parameter über den Zeitverlauf abzubilden. Dazu können für zentrale Einflussgrößen – wie etwa Energie- und Bodenpreise, klimatische Bedingungen (Temperatur, Niederschlag), regulatorische Rahmenbedingungen oder technologische Effizienzgewinne – unterschiedliche Annahmen in Form von Szenarien hinterlegt werden. Auf diese Weise lassen sich dynamische Entwicklungen berücksichtigen und Sensitivitätsanalysen durchführen, die die Robustheit der Ergebnisse gegenüber unsicheren Zukunftspfaden erhöhen. Das Tool erlaubt somit je nach Parametern auch die modellhafte Abbildung zeitlicher Veränderungen und deren Auswirkungen auf Ertrag, Ressourceneinsatz und Wirtschaftlichkeit der urbanen Anbausysteme.

2.4 Betriebliche Fallstudie des Unternehmens Kleinblatt GmbH

Um die theoretischen Erkenntnisse der vorangegangenen Forschungsmethoden effektiv mit praktischen Anwendungen zu plausibilisieren und kritisch zu überprüfen, wurde eine unternehmensbezogene Fallüberprüfung der Kleinblatt GmbH durchgeführt. Ziel war hierbei mittels teilnehmender Beobachtung und qualitativen Prozessanalysen einen belastbaren Abgleich von Kenngrößen zu den konzeptionellen Annahmen über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr Pilotbetrieb zu erhalten.

Betriebliche Fallstudien sind zur Validierung besonders wertvoll für die Untersuchung komplexer, realer Phänomene in ihrem spezifischen Kontext und eignen sich daher gut für die Analyse von Produktionsstrategien innerhalb von CEA-Systemen [CS1]. Die deskriptive Fallstudie wird verwendet, um den aktuellen Produktionsrahmen sowie die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens, einschließlich der aktuell etablierten Prozesse und Technologien, die bei der Kleinblatt GmbH zum Einsatz kommen, zu dokumentieren, zu analysieren und einen Ausblick für mögliche strategische Implikationen zu geben, welche aus der Praxis bzw. dem aktuellen Stand der Technik (Stand: Juni 2025) abgeleitet werden können.

Die Fallstudie zeigt, dass der Open-City-Farm-Ansatz ein tragfähiges Geschäftsmodell im kleinteiligen urbanen Kontext sein kann. Zugleich wird deutlich, dass die Skalierbarkeit dieses Modells von mehreren Faktoren abhängt: Zum einen erfordert eine Ausweitung erhebliche Investitionen in digitale Infrastruktur, Qualitätsmanagement und Logistiksysteme. Zum anderen bestehen Limitierungen in der Übertragbarkeit auf andere Quartiere, da lokale Nachfrage, regulatorische Rahmenbedingungen und verfügbare Flächen stark variieren. Die Fallstudie verdeutlicht somit sowohl das Potenzial eines dezentralen, zirkulären Betriebsmodells als auch die Notwendigkeit, künftige Forschungsarbeiten zur Skalierung um ökonomische, institutionelle und standortspezifische Einflussgrößen zu erweitern.

3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse entlang des eingeführten mehrstufigen Forschungsansatzes vorgestellt, der die strategische Vorausschau, die technologie-basierte Strukturierung, die quantitative Potenzialanalyse und die exemplarische Fallüberprüfung miteinander verknüpft. Den Auftakt bildet die Szenariostudie *#FutureDistricts2053* (Kap. 3.1), die stadtentwicklungs-politische Leit- und Zielbilder für resiliente Quartiere mit Fokus auf urbane Lebensmittelproduktion entwirft. Es folgt eine praxisorientierte Typologisierung von technologie-basierten Raummodulen (Kap. 3.2) und eine darauf aufbauende Potenzialanalyse urbaner Anbausysteme für Quartiere (Kap. 3.3), die auf Basis realer Flächen- und Planungsdaten sieben Stadtquartiere hinsichtlich ihrer Eignung für Controlled Environment Agriculture (CEA) untersucht. Abschließend wird mit der Fallüberprüfung am Beispiel der Kleinblatt GmbH (Kap. 3.4) ein innovatives Startup im Bereich von urbanem AgriTech hinsichtlich der wirtschaftlichen Einflussgrößen im Praxisbetrieb untersucht, welches entlang dem identifizierten Typ 2 (VIF) mit dem Konzept der *Open City Farm* (OCF) ein skalierbares, digitales und zirkuläres Betriebsmodell im Raum Stuttgart entwickelt.

Zusammengenommen liefern die drei Analyseebenen, Vision, Modellierung und Praxis, eine fundierte Einschätzung der Forschungsfrage zum Transformations- und Ertragspotenzial urbarer Ernährungssysteme im Kontext künftiger Quartiersentwicklung.

3.1 Strategische Zukunftsszenarien *#FutureDistricts2053*

Im Rahmen des vom Fraunhofer IAO initiierten strategischen Innovationsverbunds »Future District Alliance« entstand 2023 die Studie *#futuredistricts2053*, in der sechs Zukunftsszenarien zur Quartiersentwicklung ausgearbeitet wurden (siehe Bild 4). Die identifizierten Themenfelder liefern in Kombination mit dem heutigen Stand der Praxis wichtige Impulse für die Stadtentwicklung von morgen. Ein wichtiger Teilbereich des untersuchten Zukunftsräums ist die integrierte Lebensmittelproduktion im urbanen Raum. Sie stellt nicht nur eine Reaktion auf globale Herausforderungen wie Klimawandel, Biodiversitätsverlust und Ernährungssicherheit dar, sondern wird zunehmend auch zu einem strategischen Hebel für nachhaltige Stadtentwicklung.

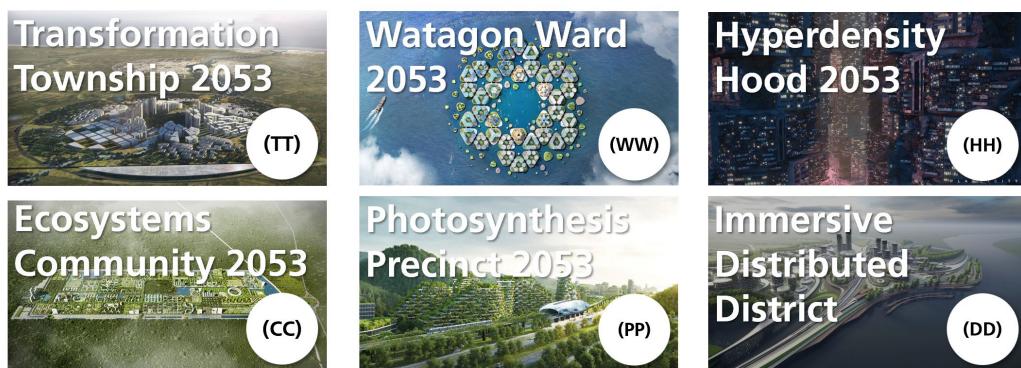


Bild 4: Übersicht der sechs explorativen Zukunftsszenarien „Future Districts 2053“

Zwei der sechs entwickelten Zukunftsszenarien – ECosystems Community 2053 und Photosynthesis Precinct 2053 – verdeutlichen exemplarisch, wie urbane Lebensmittelproduktion konzeptionell in die Planung und Gestaltung zukünftiger Stadtquartiere integriert werden kann. Beide Szenarien zeigen, dass urbane Ernährung nicht länger als Zusatz, sondern als strukturprägendes Element von urbanen Räumen gedacht werden kann und muss [KBL+17], [Ili17]:

Zukunftsszenario 3: ECosystems Community 2053 (Auszug)

In der ECosystems Community 2053 wird die Quartiersgestaltung radikal umgedacht: Statt Grünflächen als Restgröße zu behandeln, bildet ein nahezu geschlossenes Ökosystem das räumliche und funktionale Rückgrat des Quartiers. Gebäude und Nutzungen sind diesem „lebendigen Reservat“ für Pflanzen, Tiere, Pilze und Menschen untergeordnet. Hier entsteht eine Symbiose aus Architektur, Governance und Technologie, die nicht nur Kohlenstoff bindet und Kreisläufe schließt, sondern auch hochwertige Lebensmittel erzeugt – und das mitten in der Stadt. Kern der Infrastruktur bilden vertikale, kontrollierte Anbausysteme [ZKK21], [Aki24] sowie Hydro-, Aero- und Aquaponikmodule [PIK19], [PHL23], ergänzt durch genossenschaftlich betriebene Quartiersküchen und geteilte Kühlketten. Entscheidend ist: Lebensmittelproduktion geschieht hier nicht auf Kosten der Biodiversität, sondern als integraler Bestandteil. Tierische und pflanzliche Lebensräume durchziehen Erdgeschosse, Fassaden und Dächer, unterstützt durch technologische Interfaces und intelligente Steuerungssysteme [LPJ15].

Zukunftsszenario 5: Photosynthesis Precinct 2053 (Auszug)

Das Szenario Photosynthesis Precinct 2053 setzt einen anderen Schwerpunkt: Es untersucht, wie Quartiere aktiv zur Kohlenstoffbindung beitragen und dabei gleichzeitig neue Nahrungsquellen und Ressourcenkreisläufe erschließen können. Das Quartier wird konsequent CO₂-positiv konzipiert. In Fassaden werden Algen kultiviert, die nicht nur CO₂ aus der Luft ziehen, sondern als Rohstoff für Lebensmittel, Biopolymere oder Baustoffe dienen. Dabei entstehende Biomasse bildet eine neue Ressource innerhalb urbaner Wertschöpfungsketten [VCS23], [KPS25]. Auch hier spielt urbane Lebensmittelproduktion eine tragende Rolle – nicht isoliert, sondern eingebettet in ein technologisches, wirtschaftliches und soziales Ökosystem. Gemeinschaftliche CO₂-Speicher- und Verwertungsgemeinschaften ermöglichen neue Finanzierungsmodelle [TJA+17], [Sus25c-ol], während digitale Zwillinge den Betrieb laufend optimieren [GAZ+21], [Sus25d-ol].

Beide Szenarien zeigen eindrücklich, dass urbane Lebensmittelproduktion zum sozialen, ökologischen und wirtschaftlichen Rückgrat eines Quartiers werden kann – und dass politische wie planerische Reformen notwendig wären, um vergleichbare Strukturen auch in heutigen Stadtgebieten zu ermöglichen [PT24] [Sus25a-ol]. Integration in bestehende Tiefgaragen oder auf Dachlandschaften wäre technisch bereits heute realisierbar [Dan24], [Sus25b-ol]. Gleichzeitig wird erkennbar, dass gemeinschaftsbasierte Geschäftsmodelle, wie bspw. geteilte Produktions- und Verarbeitungsstrukturen, Ressourceneffizienz und auch soziale Kohäsion fördern [LSB+25], [Urb18].

Dies stützt die eingangs formulierte Hypothese, dass urbane Lebensmittelproduktion mehr sein kann als ein Nischenkonzept für urbane Gärten oder Selbstversorgung: Sie kann zum Kern einer ökologisch regenerativen und zirkulären Stadtentwicklung werden [KBL+17]. Dabei geht es

nicht allein um Technologie, sondern um neue Formen von Kooperation, Governance und räumlicher Organisation. Umsetzungen, wie das EU-Projekt AgriGo4Cities, zeigen, wie partizipativ gedachte urbane Lebensmittelproduktion und inklusive Governance zu zukunftsrobusten Stadtvierteln beitragen kann [Int25-ol].

3.2 Ableitung von drei Technologie-Raum-Basistypologien

Auf Basis unterschiedlicher Anbau- und Bewirtschaftungstechnologien aus über 100 Praxisprojekten wurden die folgenden Basistypologien als Grundlage für die anschließende Potenzialbetrachtung und Modellierung definiert:

- *Typ 1: RTGH – Rooftop Greenhouse*

Städtische Dachgewächshäuser werden in Deutschland noch meist für didaktische oder soziale Zwecke und weniger für die kommerzielle nachhaltige Lebensmittelproduktion in städtischen Gebieten eingesetzt. Sie haben den Vorteil, dass sie das Sonnenlicht als Licht- und Wärmequelle nutzen und nur teilweise künstliches Licht in lichtarmen Zeiten, z. B. in den Wintermonaten oder in bewölkten Phasen, benötigen. Kommerzielle Anlagen zeichnen sich durch hohe Einrichtungskosten und hochautomatisierte Gebäudetechnik aus, die eine (halb)kontrollierte Wachstumsumgebung schaffen.

- *Typ 2: VIF – Vertical Indoor Farming*

Vertikales Indoor-Farming kann als Praxis von übereinander gestapelten Anbausystemen in einer geschlossenen und kontrollierten Umgebung definiert werden. Durch die Verwendung von vertikal montierten Anbauregalen wird der Flächenbedarf für den Anbau von Pflanzen im Vergleich zu herkömmlichen Anbaumethoden erheblich reduziert. Je nach Technologiefokus und Industrialisierungsgrad bestehen hierbei Varianten von zimmerhohen (zwei bis drei Meter) bis hallenhohen (mehr als vier Meter) Systemen. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Typ als »Upgrade« in leerstehenden bzw. ungenutzten Innenräumen (z.B. leerstehende Büroflächen) zum Einsatz kommt und je nach Grundriss entsprechend modular geplant wird.

- *Typ 3: UFC – Urban Farming Container*

UFC sind in sich geschlossene, transportable Anbaueinheiten, die vertikale hydroponische Techniken in kontrollierten Umgebungen anwenden. Sie zeichnen sich durch ein hohes Maß an Standardisierung auf Basis von TEU-Containern (20“) aus. Zu den Vorteilen gehören Modularität, Kompaktheit, Verwendbarkeit im Außenraum, Benutzerfreundlichkeit und leichte Transportfähigkeit. Es ist zu beachten, dass UFC erhebliche Einschränkungen in Bezug auf die der sehr dichte Wachstumsumgebung (Wärme, Feuchtigkeit, Schädlinge, ...) haben können. Hierzu sollten UFC mit angemessenen Kontrollsystmen konzipiert werden, um die Vorteile auch zu erreichen.

3.3 Zukünftige Potenziale urbaner Anbausysteme auf Quartiersebene

Aufbauend auf dem in Kapitel 2.4 erläuterten Berechnungstool werden im Folgenden ausgewählte Analyseergebnisse zum Zukunftspotenzial urbaner Anbausysteme in verschiedenen Quartieren der Verbundpartner der Future District Alliance präsentiert. Insgesamt wurden sieben Quartiersentwicklungen in unterschiedlichen Phasen, von der Brachflächenkonversion bis zum laufenden Betrieb, unter Verwendung öffentlich zugänglicher Informationen und Plangrundlagen quantitativ untersucht. Diese umfassen eine Gesamtfläche von 54 Hektar und erstrecken sich über fünf Städte (Frankfurt, Hamburg, München, Stuttgart und Worms). Die Potenzialanalysen lassen sich entlang dreier Basisszenarien für die Jahre 2025, 2035 und 2050 zeitlich aufbauen, die jeweils unterschiedliche Stufen der Flächenaktivierung für urbane Anbausysteme im Lebenszyklus auf Basis plausibler Entwicklungspfade abbilden (→ Leitplanken aus Szenarioentwicklung), u.a. zum Rückgang von PKW-Besitz in urbanen Räumen infolge der Verkehrswende, anhaltend geringer Bedarf an klassischen Büroflächen oder zunehmende Automatisierung durch KI und Robotik den Aufbau neuer leichter Dachaufbauten [BLS24].

Die aggregierte Potenzialanalyse über alle Quartiere (bei einheitlichen Randbedingungen) stellt für das Jahr 2050 ein jährliches Produktionsvolumen von nahezu 23.000 Tonnen Gemüse (siehe Bild 5) in Aussicht, unter der Prämisse, dass eine frühzeitige strategische Vorrüstung bereits in der Planungsphase hinsichtlich notwendiger Abläufe und technischer Schnittstellen erfolgt und sämtliche verfügbare Flächen aktiviert werden. Auf Basis der zugrundgelegten Basisszenarien und oben beschriebenen Leitplanken wird davon ausgegangen, dass in einem Quartier oder Campus im Jahr 2050 bis zu 75 % heutiger Stellflächen für Urban-Farming-Container, 64 % der Brutto-Dachflächen für Dachgewächshäuser sowie bis zu 1,5 Vollgeschosse für vertikales Indoor-Farming zur Verfügung stehen können [BLS24].

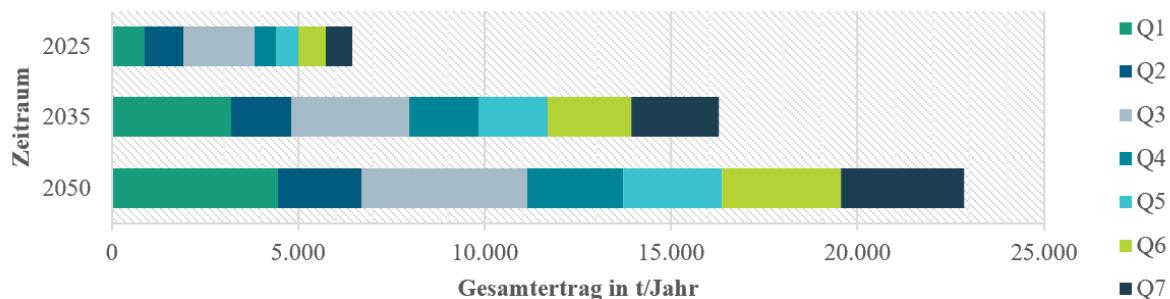


Bild 5: Theoretisches Ertragspotenzial der untersuchten Quartiere (Q1-Q7) bis 2050

Beispiel: Fraunhofer-Campus Stuttgart

Eines der analysierten Quartiere ist der Fraunhofer-Campus Stuttgart. Mit fünf Instituten und über 1.700 Mitarbeitenden auf einer Fläche von 6,6 Hektar stellt er das zweitgrößte Forschungszentrum der Fraunhofer-Gesellschaft dar. In Tabelle 1 sind die für den Betrieb urbaner Anbausysteme auf dem Campus angenommenen Flächengrößen in den Referenzzeiträumen 2025, 2035 und 2050 basierend auf den Basisszenarien zur Flächenverfügbarkeit aufgeführt [BLS24].

Tabelle 1: Potenzielle Flächenverfügbarkeit für den Betrieb urbaner Anbausysteme am Fraunhofer-Campus Stuttgart bis zum Jahr 2050

Jahr	2025	2035	2050	Einheit
Typ 3: Urban Farming Container	2.400	4.800	7.200	m ²
Typ 2: Vertical Indoor Farming	9.180	18.360	27.540	m ²
Typ 1: Rooftop Greenhouse	18.360	18.360	18.360	m ²
Σ	29.940m ²	41.520m ² (+38%)	53.100m ² (+28%)	

Nach Eingabe der Flächenannahmen ermittelt das Berechnungstool die Potenziale und Rahmenbedingungen von CEA-Systemen am Fraunhofer-Campus Stuttgart anhand der definierten Leistungskennzahlen. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgeführt. Das Produktionspotenzial bezieht sich beispielhaft auf den Anbau von Salat als Blattgemüse, der aufgrund seiner kurzen Wachstumszeit, seines geringen Platzbedarfs und der hohen Nachfrage ein besonders attraktives urbanes Anbauprodukt ist [BLS24].

Tabelle 2: Potenziale integrierter Lebensmittelproduktion am Fraunhofer-Campus Stuttgart

Gesamtpotenzial	Ø	Ø	Ø	Einheit
K ₁ : Gesamtbruttoproduktion	1.933	3.189	4.445	t
K ₂ : Schaffung Brutto-Arbeitsstunden	654.082	1.143.843	1.633.603	h
K ₃ : Gesamtenergieverbrauch	43.899.359	84.909.925	125.920.492	kWh
K ₄ : Gesamtwasserverbrauch	14.142.218	28.100.836	42.059.455	l
K ₅ : Möglicher Verzicht bisher genutzter Ackerfläche	615.241	1.014.915	1.414.589	m ²
K ₆ : Flächenbedarf Freiland-PV (bei 100% EE-Nutzung)	270.079	522.385	774.691	m ²
K ₇ : Gesamtbilanz THG-Emissionen (Scope 2)	15.145	29.294	43.443	kg CO ₂ e

Je nach Art und Nutzung der Gebäude und Außenräume unterscheiden sich die baulich-räumlichen Integrationspotenziale für urbane Anbausysteme in den analysierten Quartieren teils deutlich voneinander. Dies hat zur Folge, dass die absolute Flächenverfügbarkeit in einem Quartier bei der vergleichenden Betrachtung der potenziellen Leistungsfähigkeit nur eine zweitrangige Rolle spielt und individuelle Lösungen erforderlich sind [BLS24].

3.4 Fallstudie Kleinblatt als Open City Farm (Typ 2)

Die Kleinblatt GmbH betreibt als Startup seit Dezember 2023 pilotaft Stuttgarts erste Open City Farm (OCF) und ist damit Vorreiter eines einzigartigen und nachhaltigen Modells der kleinräumigen CEA. Das Unternehmen hat sich auf den Anbau von Microgreens und Gourmetpilzen spezialisiert und verbindet dabei eine Zero-waste-Philosophie mit einer vertikalen Integration von Produktionssystembau, Pflanzenproduktion, Vertrieb und Bildung. Im Mittelpunkt des Ansatzes steht der Einsatz selbst entworfener, modularer, 3D-gedruckter Anbausysteme, die einen flexiblen und ressourcen-effizienten Anbau in ungenutzten Innenräumen dicht bebauten städtischen Gebieten ermöglichen.

Kleinblatt beliefert Gastronomiekunden in einem hyperregionalen Umkreis, reduziert so die transportbedingten CO₂-Emissionen, nutzt eine wiederverwendbare Produktions- und Lieferkette und verwertet das Substrat der Microgreens für die Pilzzucht. Ambitionierte Ziele wie null transportbedingte CO₂-Emissionen, null Einwegplastik und null organische Abfälle sind Kernelemente der Nachhaltigkeitsvision des Unternehmens. Das Konzept der OCF bezieht sich auf ein offenes Design, bei dem Systeme, Produkte und Prozesse transparent, kollaborativ und zugänglich sind [CS2]. Als Standort für die OCF wurde eine ehemalige Einzelhandelsfläche im Zentrum von Stuttgart gewählt, die sehr gut erreichbar ist.

Eine der zentralen wirtschaftlichen Herausforderungen für das Unternehmen ist die Stückkostenrechnung seiner Produkte: Die Produktionskosten sind in der Regel hoch, während die Gewinnmargen gering bleiben, wodurch es wenig Spielraum für betriebliche Fehler gibt. Klassische Lieferketten mit langen Transportwegen und Zwischenhändlern führen oft zu erheblichen Ineffizienzen: Bis zu 30 % der Produktmargen gehen durch Verderb verloren, weitere 20 % durch Zwischenhändlerkosten. Kleinblatt begegnet diesem Problem mit einem angepasstem Geschäftsmodell: Direktverkauf an den Kunden und hyperlokale Produktion, wodurch sowohl Verluste in der Lieferkette als auch Kosten für Zwischenhändler entfallen. Um dieses Modell in großem Maßstab zu ermöglichen, baut Kleinblatt eine digitale Infrastruktur auf, die Qualitätssicherung, Schädlingsbekämpfung und Lebensmittelsicherheitsprotokolle in einem zusammenhängenden operativen Rückgrat namens „AI Gardener“ integriert. Diese digitale Software ist unerlässlich, um sicherzustellen, dass CEA-Systeme, egal ob groß oder klein, effizient, zuverlässig und profitabel arbeiten.



Bild 6: zirkulärer CEA-Produktionsansatz von Kleinblatt für „Zero-waste“

In einem betrieblichen Umfeld wie der OCF gehen die wirtschaftlichen Folgen von Produktverlusten über den unmittelbaren Ertragswert hinaus. Eine versäumte Lieferung aufgrund von Qualitätsproblemen kann nicht nur zu einem finanziellen Verlust für eine einzelne Charge führen, sondern auch zu einem langfristigen Verlust des Kundenvertrauens und der Kundenbindung. Dies ist insbesondere angesichts des hohen Lifetime Value (LTV) von Stammkunden von Bedeutung. Ein kleiner Kunde, hat beispielsweise einen Jahreswert von ca. 3.026 €. Bei einem Großkunden mit einem Jahreswert von ca. 60.528 € und einen LTV über fünf Jahre von über 302.640 € hat, steht noch mehr auf dem Spiel. Schon ein einziger Lieferausfall kann eine langfristige Kundenbeziehung gefährden, weshalb die konsistente Lieferung hochwertiger, zuverlässiger Produkte von entscheidender Bedeutung ist. Dies schafft starke Anreize für operative

Exzellenz, insbesondere in den Bereichen Qualitätsmanagement, Lebensmittelsicherheit und präventiver, datengestützter Schädlingsbekämpfung.

Kleinblatts Ansatz der OCF funktioniert wirtschaftlich und weist eine Doppelstrategie auf, die sowohl professionelle Infrastruktur (1) als auch dezentrale Nutzerbeteiligung (2) nutzt, um städtische Lebensmittelproduktion und digital gestützte Lieferketten voranzutreiben. Erstens können größere, professionell betriebene Produktionsstätten als Forschungs- und Entwicklungszentren dienen, in denen der Anbau unter kontrollierten, standardisierten Bedingungen erfolgt. Diese Umgebungen eignen sich ideal für das Training des „AI Gardener“-Systems, da sie die Erfassung hochwertiger, rauscharmer Datensätze ermöglichen. Diese kontrollierte Datenerfassung ist für die Entwicklung robuster Entscheidungsalgorithmen unerlässlich. Zweitens kann Kleinblatt seine Wirkung durch die Unterstützung von dezentralen Nutzern sowohl durch Vor-Ort-Hilfe als auch durch digitale Tools erweitern. Lokale OCFs können als Bildungszentren fungieren und Workshops, Beratungen und Zugang zu Hardware für CEA-Systeme anbieten. Gleichzeitig könnte der „AI Gardener“ als Fernberatungsplattform dienen. Dieser hybride Ansatz ermöglicht ein skalierbares Modell für den Wissenstransfer, bei dem professionelle Anbauer Daten und Innovationen bereitstellen, während dezentrale Nutzer zur gemeinschaftsbasierten Ernährungssicherheit beitragen.

4 Diskussion und Ausblick

Der vorliegende Beitrag beantwortet die Frage, wie im komplexen Technologiefeld urbaner Systeme frühzeitig Methoden der strategischen Vorausschau, der quantitativen Modellierung sowie der Überprüfung anhand einer praktischen Fallstudie in einem Startup zur Markterschließung hyperlokaler Lebensmittelproduktion kombiniert werden können. In dieser emergenten Industrie gibt es quasi noch kaum etablierte Prozesse oder Geschäftsmodelle, die meisten Projekte oder Gründungen befinden sich noch in einem sehr frühen Stadium und sind jünger als fünf Jahre – selbst bei zeitweise erfolgreichen Unternehmen sind Insolvenzen oder anhaltende technische Barrieren noch an der Tagesordnung (vgl. Infarm [Pli24]).

Fundierte Prognosen zu urbanen Anbaupotenzialen in bestehenden oder geplanten Quartieren sind von hoher Bedeutung. Werden sie frühzeitig von oder für Projektentwickler erstellt, wie z.B. im Rahmen der Future District Alliance, können sie wichtige strategische Impulse liefern. Sie ermöglichen es, urbane Anbausysteme bereits in der frühen Planungsphase technisch, wirtschaftlich und räumlich mitzudenken. Das schafft die Grundlage für eine integrierte, zukunfts-fähige Quartiersentwicklung. Dies ist wiederum von zentraler Bedeutung dafür, dass Unternehmen in diesem Sektor vor dem Hintergrund der in Kapitel 1 aufgeführten Entwicklungen und Herausforderungen künftig einen wirksamen Beitrag in Kooperation mit der Immobilienwirtschaft zur Sicherung der städtischen Lebensmittelversorgung leisten können.

Umso wichtiger scheint der gewählte systemische Ansatz für die Beantwortung der Forschungshypothese, der innovative Lösungen und Potenziale nicht aus der Technologie selbst, sondern mit einem hohen Fokus auf das Anwendungsfeld im urbanen Umfeld legt. Hierbei wurde mit der vorliegenden Studie erfolgreich ein mehrstufiges Vorgehensmodell gewählt, das

als Outside-In-Perspektive bezeichnet werden kann [Tom09]: Es beruht nicht auf einem singulären unternehmenszentrierten Handlungsansatz (Inside-Out), sondern identifiziert auf Basis typischer Stadtentwicklungsprozesse (Quartiersentwicklungen) die technologisch-räumlichen Potenziale generell für anschließende Gründungen bzw. unternehmerisches Handeln.

Dabei kommt der Immobilienwirtschaft in Zukunft – auch wenn sie bisher nicht als besonders innovativ wahrgenommen wird - als handelndem Akteur eine besondere Bedeutung zu, was auch als Ausgangsbasis der Forschungsarbeiten zu verstehen ist. Im Hinblick auf die zukunftsrobuste Aktivierung von hyperlokaler Lebensmittelproduktion in der Quartiersentwicklung werden die folgenden zentralen Schlüsse aus den Ergebnissen gezogen:

- 1) Das technologisch-räumliche Potenzial in Quartieren ist in der Realität nicht zu unterschätzen, wird aber meist als „blinder Fleck“ betrachtet bzw. noch nicht erkannt. In den Frühphasen einer Quartiersentwicklung wird beispielsweise keine Szenariobetrachtung eingesetzt, meist werden nur primäre Ertragsmodelle für entstehende Flächen betrachtet (ohne Fokus auf sekundäre Nutzungen wie hyperlokale Lebensmittelproduktion).
- 2) Zentrale Chance und Herausforderung zugleich für UrbanTech- bzw. AgriTech-Gründungen liegt in der dezentralen *Organisation* bzw. *Bewirtschaftung* entlang der drei definierten Typologien (vgl. Kapitel 1.3). Einerseits erschwert dies konventionelle Kosteneinsparungen bzw. Effizienzgewinne gegenüber einer zentralen, d.h. aggregierten, Produktionsstätte, andererseits bietet sich dadurch (bei entsprechender modularer Ausgestaltung) eine hohe Flexibilität und damit auch Robustheit im Geschäftsbetrieb.
- 3) Zudem sind gängige Geschäfts- und Finanzierungsmodelle in der Immobilienwirtschaft eher als Innovationsbarrieren zu betrachten: Quartiersentwicklungen sind meist mit einem „Exit“ vor Fertigstellung bzw. Inbetriebnahme versehen, so dass Entwickler und Betreiber unterschiedliche Akteure sind und meist unterschiedliche Ziele verfolgen. Eine strategische Vorrüstung von Flächen in der Planung wird somit nicht automatisch im Betrieb weiterverfolgt.

Auf Basis dieser Schlussfolgerungen können zwei Handlungsbedarfe für die strategische Vorausschau von Quartieren als urbane Kornkammern und eine „unternehmerische Aktivierung“ durch neue Geschäftsbereiche oder Gründungen abgeleitet werden: Es bedarf neuartiger Kooperations- und Finanzierungsmodelle entlang der Produktentwicklung, die vor allem eingangs bereits genannte Wandlungstreiber (vgl. Kapitel 1) kostenseitig und als Chancenfaktoren berücksichtigen. Außerdem braucht es einfache Planungs- und Berechnungsmodelle, um die Potenziale für die wesentlichen Akteure gleichermaßen transparent zu ermitteln:

- 1) Für *Immobilienwirtschaft, Kapitalgeber und Projektentwickler*, um Risiken und Chancen frühzeitig zu identifizieren und Entscheidungsoptionen aufzuzeigen.
- 2) Für *Technologieanbieter und Startups*, um belastbare Leitplanken und Grundlagen für angepasste Lösungen, Geschäfts- und Betreibermodelle im Anwendungsfeld „Quartier“ zu erhalten.
- 3) Für *öffentliche Hand und Kommunalverwaltungen*, um bereits in der Phase der Flächennutzungs- oder Bauleitplanung (=Voraussetzungen für ein Quartier mit integrierter hyperlokaler Lebensmittelproduktion) diese als Anforderungen zu definieren.

Die wissenschaftliche Bedeutung dieses Beitrags wird insbesondere durch zwei Aspekte hervorgehoben. Zum einen bietet das methodische Mehrebenenmodell erstmals einen strukturierteren Forschungsansatz, der die Brücke von der technologischen Vorausschau bis zur unternehmerischen Fallstudie schlägt. Zum anderen stellen die beispielhaften Berechnungsmodelle ausgewählter Quartiersentwicklungen erstmals vergleichbare Metriken und Abschätzungen für detaillierte Machbarkeitsstudien und Portfolioanalysen für die Wirtschaft dar.

Weitere Forschungsbedarfe ergeben sich aus den Limitationen der mehrstufigen Studie, da eine breite Empirie aufgrund begrenzter Ressourcen und fehlender Forschungsdaten bisher nicht möglich war. Die Verwendung der drei eingeführten Typologien RTGH, VIF und UFC stellen zudem eine bewusste Simplifizierung eines eher heterogenen und emergenten Technologiefelds dar, die dennoch als robuste Grundlage zu sehen ist. In zukünftigen Untersuchungen sollte somit analysiert werden, welche technologisch-wirtschaftlichen Wechselwirkungen zwischen den modellierten Potenzialen und der zukunftsrobusten Überprüfung in der Praxis von Quartieren in diversen Immobilienportfolios bestehen.

Die kritische Selbstreflexion verdeutlicht dabei, dass das mehrstufige methodische Vorgehen trotz seiner strukturierten Anlage durch die vereinfachende Typologisierung und die begrenzte empirische Basis in seiner Validität eingeschränkt ist. Die Ergebnisse sind daher als explorativ zu verstehen, und die abgeleiteten Empfehlungen besitzen vorläufigen Charakter. Um die Robustheit zu erhöhen, sollten künftige Studien sowohl durch breitere empirische Erhebungen als auch durch Validierungsstudien im Praxisfeld gestützt und stärker mit ökonomischen, institutionellen und politischen Kontextbedingungen verknüpft werden. Der Beitrag ist daher weniger als abschließende Bewertung, sondern vielmehr als Impuls und Diskussionsgrundlage für Forschung und Praxis zu verstehen. Vor diesem Hintergrund ist insbesondere die Rolle externer Einflussfaktoren hervorzuheben, die über die tatsächliche Realisierung der modellierten Potenziale entscheiden.

Die tatsächliche Realisierung der modellierten Potenziale hängt jedoch in erheblichem Maße von externen Faktoren ab. Dazu zählen insbesondere die ökonomische Tragfähigkeit der Geschäftsmodelle, die Entwicklung lokaler Liefer- und Wertschöpfungsketten sowie die Ausgestaltung politischer und regulatorischer Rahmenbedingungen. Die vorliegende Analyse liefert damit einen wichtigen, aber noch vorläufigen Baustein für die Bewertung urbaner Anbausysteme. Zukünftige Forschung sollte diese Kontextbedingungen systematisch integrieren, etwa durch die Kopplung mit Markt- und Preissimulationen, die Modellierung regulatorischer Szenarien oder die Einbettung in Governance- und Kooperationsmodelle. Auf diese Weise ließe sich die Aussagekraft der Analysen erhöhen und ihre Übertragbarkeit auf unterschiedliche Quartierstypen weiter verbessern.

Über den spezifischen Kontext der urbanen Lebensmittelproduktion hinaus lässt sich das gewählte Vorgehen prinzipiell auf weitere Transformationsfelder übertragen. Die Kombination aus strategischer Vorausschau, quantitativer Potenzialmodellierung und praxisnaher Fallüberprüfung bildet ein modulares Forschungsdesign, das sich u. a. für Fragen in den Bereichen Energie, Mobilität und Kreislaufwirtschaft anwenden lässt. Entscheidend ist die frühe Verzahnung explorativer Szenarien mit messbasierten Potenzialanalysen und empirischer Validierung,

um technologische, räumliche und organisatorische Innovationen kontextspezifisch zu bewerten. Eine solche Übertragbarkeit erhöht den wissenschaftlichen und praktischen Impact des Ansatzes über das hier behandelte Themenfeld hinaus.

Literatur

[BLS24] BRAUN, S.; SCHUBERT, F.; LETZGUS, M. (2024): Zukünftige Potenziale urbaner Anbausysteme auf Quartiersebene. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart.

[Hab22] HABERZETTL, J.: A KPI-based model for the quantitative assessment of economic and environmental potentials of urban farming systems. Masterarbeit im Studiengang Bioökonomie an der Universität Hohenheim, 2022

[WWF17] Das große Wegschmeissen - <https://www.wwf.de/themen-projekte/landwirtschaft/ernaehrungskonsum/lebensmittelverschwendungen/das-grosse-wegschmeissen>. Online-Ressource, Letzter Zugriff: 16. Juni 2025

[Fuß25] FUß, R. (2025): Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft - <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fuer-den-klimaschutz/treibhausgas-emissionen-aus-der-landwirtschaft>. Letzter Zugriff: 15. Juni 2025

[CoK12] COCKRALL-KING, J. (2012): Food and the City: Urban Agriculture and the New Food Revolution, Prometheus Books, New York. ISBN: 9781616144586

[Bra23] BRAUN, S.; DIENES, K.; LETZGUS, M.; LEYH, J. (2023): #futuredistricts2053. Strategische Zukunftsszenarien und Handlungsanforderungen für die Quartiersentwicklung, Fraunhofer IAO. <https://doi.org/10.24406/publica-1932>.

[Aer24] AeroFarms - The Vertical Farming Company. <https://www.aerofarms.com/>. Letzter Zugriff: 15. Juni 2025

[Bra24] BRAUN, S. (2024): Urban Innovation Pattern Language, Dissertation. Universität Stuttgart. <http://dx.doi.org/10.18419/opus-14392>

[FDA25] Homepage des Innovationsnetzwerks Future District Alliance, www.future-districts.de. Letzter Zugriff: 15. Juni 2025

[Pli24] PLICH, N. (2024), Internetartikel, <https://www.businessinsider.de/gruenderszene/business/in-farm-gruender-droht-jetzt-schon-die-pleite-der-naechsten-firma/>

[Tom09] TOMCZAK, T., KUB, A., REINECKE, S. (2009). Informationsgrundlagen der Marketingplanung. In: Marketingplanung. Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-8280-3_2, 58–59.

[KBL+17] KASPER, C.; BRANDT, J.; LINDSCHULTE, K.; GISEKE, U. (2017): The Urban Food System Approach: Thinking in Spatialized Systems. DOI: 10.1080/21683565.2017.1334737.

[Ili17] ILIEVA, R.T. (2017): Urban Food Systems Strategies: A Promising Tool for Implementing the SDGs in Practice. DOI: 10.3390/su9101707.

[ZKK21] ZAREBA, A.; KRZEMIŃSKA, A.E.; KOZIK, R.: Urban Vertical Farming as an Example of Nature-Based Solutions Supporting a Healthy Society Living in the Urban Environment. DOI: 10.3390/resources10110109, 2021

[Aki24] AKINTUYI, O.B. (2024): Vertical farming in urban environments: A review of architectural integration and food security. DOI: 10.53022/oarjbp.2024.10.2.0017

[PIK19] PROKSCH, G.; IANSCHENKO, A.; KOTZEN, B. (2019): Aquaponics in the Built Environment. In: Aquaponics Food Production Systems, S. 523–558. DOI: 10.1007/978-3-030-15943-6_21.

[PHL23] PROKSCH, G.; HORN, E.; LEE, G. (2023): Urban integration of aquaponics: advancing integrated food systems for the circular city. In: Urban and Regional Agriculture, S. 403–430. DOI: 10.1016/B978-0-12-820286-9.00014-5.

[LPJ15] LIN, B.B.; PHILPOTT, S.M.; JHA, S. (2015): The future of urban agriculture and biodiversity-ecosystem services: Challenges and next steps. DOI: 10.1016/j.baae.2015.01.005.

[PT24] PHELPS, J., TURNER, L. (2024): Zoning for Urban Agriculture. A Guide for Updating Your Community's Laws to Support Healthy Food Production and Access. Online verfügbar unter <https://healthyfoodpolicyproject.org/key-issues/zoning-for-urban-agriculture>.

[Sus25a-ol] Sustainability Directory: Urban Agriculture and Food Policy Reform. Online verfügbar unter: <https://prism.sustainability-directory.com/scenario/urban-agriculture-and-food-policy-reform>, Letzter Zugriff: 17. Juni 2025

[Dan24] DANESHYAR, E. (2024): Residential Rooftop Urban Agriculture: Architectural Design Recommendations. DOI: 10.3390/su16051881.

[Sus25b-ol] SUSTAINABILITY DIRECTORY: Policy Frameworks for Sustainable Urban Agriculture Development and Food Access. Online verfügbar unter: <https://prism.sustainability-directory.com/scenario/policy-frameworks-for-sustainable-urban-agriculture-development-and-food-access>, Letzter Zugriff: 17. Juni 2025

[LSB+25] LOPEZ-MUÑOZ, F.; SOTO-BRUNA, W.; BAPTISTE, B.L.G.; LEON-PULIDO, J.: Evaluating Food Resilience Initiatives Through Urban Agriculture Models: A Critical Review. DOI: 10.3390/su17072994, 2025

[Urb18] Urban Land Institute: Agrihoods. Cultivating Best Practices. ISBN: 978-0-87420-421-6, 2018

[VCS23] VILLALBA, M.; CERVERA, R.; SÁNCHEZ, J. (2023): Green Solutions for Urban Sustainability: Photobioreactors for Algae Cultivation on Façades. DOI: 10.3390/buildings13061541

[KPS25] KIM, K.H.; PARROW, M.W.; SANGDEH, P.K.: Microalgae-integrated building enclo-sures: a nature-based solution for carbon sequestration. DOI: 10.3389/fbuil.2025.1574582, 2025

[TJA+17] TEFFT, J.; JONASOVA, M.; ADJAO, R.; MORGAN, A.: Food Systems for an Urbanizing World. Online verfügbar unter: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/454961511210702794/pdf/Food-systems-for-an-urbanizing-world-knowledge-product.pdf>, 2017

[Sus25c-ol] SUSTAINABILITY DIRECTORY: Financing Urban Food Production Initiatives. Online verfügbar unter: <https://prism.sustainability-directory.com/scenario/financing-urban-food-production-initiatives>, Letzter Zugriff: 17. Juni 2025

[GAZ+21] GHANDAR, A.; AHMED, A.; ZULIFIQAR, S.; HUA, Z.: A Decision Support System for Urban Agriculture Using Digital Twin: A Case Study With Aquaponics. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3061722, 2021

[Sus25d-ol] SUSTAINABILITY DIRECTORY: Digital Twins for Urban Vertical Farming Initiatives. Online verfügbar unter: <https://prism.sustainability-directory.com/scenario/digital-twins-for-urban-vertical-farming-initiatives>, Letzter Zugriff: 17. Juni 2025

[Int25-ol] INTERREG: AgriGo4Cities Urban agriculture for changing cities: governance models for better institutional capacities and social inclusion. Online verfügbar unter <https://dtp.interreg-danube.eu/approved-projects/agrigo4cities> Letzter Zugriff 17.Juni 2025

[CS1] YIN, R. K. (2018). Case study research and applications: Design and methods (6th ed.). SAGE Publications. Retrieved March 15, 2025, from <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/case-study-research-and-applications/book250150>

[CS2] BOISSEAU, É., OMHOVER, J.-F., & BOUCHARD, C. (2018). Open-design: A state of the art review. *Design Science*, 4, e3. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.25>

Autoren

Dr.-Ing. Steffen Braun ist stellvertretender Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO in Stuttgart. Von 2016 bis 2024 war er Mitglied des Direktoriums und Leiter des Forschungsbereichs »Stadtsystem-Gestaltung«. Er war bereits 2010 als wissenschaftlicher Mitarbeiter Mitbegründer der Fraunhofer-Initiative Morgenstadt für eine systemische Technologiegestaltung zukunftsrobuster Städte mit dem damaligen Fraunhofer-

Präsidenten Prof. Dr. Bullinger. Seine Promotion an der Schnittstelle von Stadtentwicklung und Technologiemanagement hat er zur »Entwicklung einer Mustersprache für Innovationsdiffusion in urbanen Systemen« an der Universität Stuttgart abgeschlossen.

Prof. Dr-Ing. Vanessa Borkmann ist Forschungsdirektorin am Fraunhofer IAO und leitet den Bereich »Stadtsystem-Gestaltung« mit über 40 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Sie ist seit 2018 Professorin für Tourismus mit Schwerpunkt Hotel Management an der SRH Berlin University for Applied Sciences. Sie promovierte an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Stuttgart mit dem Thema »Psychische Belastung und Beanspruchung von geschäftlich Reisenden während des Hotelaufenthalts«. Vanessa Borkmann ist mehrfach ausgezeichnet für Technologiemanagement und eigene Innovationsentwicklungen sowie Mitglied in Fachgremien, Bei- und Aufsichtsräten.

Katharina Dienes ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation und freie Autorin beim polis Magazin für Stadt- und Projektentwicklung. Nach dem Architekturstudium mit Schwerpunkt Städtebau absolvierte sie eine journalistische Zusatzausbildung und forscht heute zu Innovation und Kreativität im urbanen Kontext, Co-Living-Modellen und zukünftigen Arbeitswelten. Derzeit promoviert sie an der Universität Stuttgart zu Dritten Arbeitsorten und Innovationsökosystemen.

Frederic Schubert ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich »Stadtsystem-Gestaltung« des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO in Stuttgart. Zuvor absolvierte er ein Studium der Medienwirtschaft an der Stuttgart Media University und arbeitete parallel dazu als wissenschaftliche Hilfskraft. Der Schwerpunkt seiner Forschung liegt auf der Analyse und Gestaltung der digitalen Transformation urbaner Akteure aus dem öffentlichen und privatwirtschaftlichen Bereich.

Jedrzej Cichocki ist Geschäftsführer der Kleinblatt GmbH, einer Open City Farm (OCF) in Stuttgart und Absolvent der Agrarwissenschaften an der Universität Hohenheim. Berufliche Stationen führten ihn unter anderem zu Geco-Gardens, Smart Farming Systems und Minga Farm, wo er bereits vor Jahren an der Entwicklung innovativer Anbausysteme arbeitete. Seine Forschung und Praxis fokussieren sich auf Kreislaufwirtschaft, Lebensmittelsicherheit und digital gestützte Prozessgestaltung im urbanen Agrarsektor.

acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

acatech advises policymakers and the general public, supports innovation policy decision-making, and represents the interests of the technological sciences internationally. In accordance with its mandate from Germany's federal government and states, the Academy provides independent, science-based advice that is in the public interest. acatech explains the opportunities and risks of technological developments and helps to ensure that ideas become innovations – innovations that lead to greater prosperity, welfare, and quality of life. acatech brings science and industry together. The Academy's Members are distinguished scientists from the fields of engineering, the natural sciences and medicine, as well as the humanities and social sciences. The Senate is made up of leading figures from major science organisations and from technology companies and associations. In addition to its headquarters at the acatech FORUM in Munich, the Academy also has offices in Berlin and Brussels.

Fraunhofer-Verbund Innovationsforschung

Wandel verstehen, Zukunft gestalten

Das Wissen um die komplexen Wirkzusammenhänge innerhalb von Innovationssystemen ist erfolgskritisch für Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und Gesellschaft. Die Veränderung von Branchen, Märkten und Technologien muss daher frühzeitig erkannt und verstanden werden, um die langfristigen Auswirkungen in ökonomischer, technologischer, sozialer, politischer sowie kultureller Hinsicht aktiv gestalten zu können. Als kompetenter Partner mit einer einzigartigen Verknüpfung von sozioökonomischer sowie soziotechnischer Forschung gibt der Fraunhofer-Verbund Innovationsforschung Orientierung, erleichtert die Positionsbestimmung und unterstützt bei der Zukunftsgestaltung im Innovationssystem.

Fraunhofer Group for Innovation Research

Understanding change, shaping the future

Understanding the complex interdependencies within systems of innovation is critical for business, government, science, and society to succeed. For this reason, it is important to recognize change as soon as it emerges in any sector, market or technology. Only by comprehending such change, can we actively influence its long-term economical, technological, societal, governmental, and cultural impact. As an expert partner that uniquely combines socioeconomic and sociotechnical research, the Fraunhofer Group for Innovation Research provides stakeholders with orientation, facilitates them in positioning themselves, and assists in shaping the future in the innovation system.

Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut neun Professoren mit insgesamt 150 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Pro Jahr promovieren hier etwa 20 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: Enroute to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrow's economy.

Today nine Professors and 150 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. Per year approximately 20 young researchers receive a doctorate.

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

Bd. 407 JAVED, A. R.: Mixed-Signal Baseband Circuit Design for High Data Rate Wireless Communication in Bulk CMOS and SiGe BiCMOS Technologies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 407, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-26-2

Bd. 408 DUMITRESCU, R., KOLDEWEY, C.: Daten-gestützte Projektplanung. Fachbuch. Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 408, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-27-9

Bd. 409 PÖHLER, A.: Automatisierte dezentrale Produktionssteuerung für cyber-physische Produktionssysteme mit digitaler Repräsentation der Beschäftigten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 409, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-28-6

Bd. 410 RÜDDENKLAU, N.: Hardware-in-the-Loop-Simulation von HD-Scheinwerfer-Steuergeräten zur Entwicklung von Lichtfunktionen in virtuellen Nachtfahrten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 410, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-29-3

Bd. 411 BIEMELT, P.: Entwurf und Analyse modell-prädiktiver Regelungsansätze zur Steigerung des Immersionsempfindens in interaktiven Fahrsimulationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 411, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-30-9

Bd. 412 HAAKE, C.-J., MEYER AUF DER HEIDE, F., PLATZNER, M., WACHSMUTH, H., WEHRHEIM, H. (Eds.): On-The-Fly Computing - Individualized IT-Services in dynamic markets, Collaborative Research Centre 901 (2011 - 2023), Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 412, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-31-6

Bd. 413 DUMITRESCU, R.; HÖLZLE, K. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 17. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 14./15. September 2023, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 413, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-32-3

Bd. 414 ABUGHANNAM, S.: Low-power Direct-detection Wake-up Receiver at 2.44 GHz for Wireless Sensor Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 414, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-33-0

Bd. 415 REINHOLD, J.: Systematik zur musterbasierten Transformation von Wertschöpfungssystemen für Smart Services. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 415, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-34-7

Bd. 416 YANG, X.: Eine Methode zur Unterstützung von Entscheidungen bei der Entwicklung modularer Leichtbauprodukte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 416, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-35-4

Bd. 417 GRÄLER, M.: Entwicklung adaptiver Einrichtassistentensysteme für Produktionsprozesse. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 417, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-36-1

Bd. 418 RÖSMANN, D.: Menschzentrierte Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 418, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-37-8

Bd. 419 BAHMANIAN, M.: Optoelectronic Phase-Locked Loop, Theory and Implementation. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 419, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-38-5

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

Bd. 420 HEIHOFF-SCHWEDE, J.: Spezifikationstechnik zur Analyse, Gestaltung und Bewertung von Engineering-IT-Architekturen. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 420, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-39-2

Bd. 421 MEYER, M.: Systematik zur Planung und Verwertung von Betriebsdaten-Analysen in der strategischen Produktplanung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 421, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-40-8

Bd. 422 MALENA, K.: Konzipierung, Analyse und Realumsetzung eines mehrstufigen modellprädiktiven Lichtsignalanlagenregelungssystems. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 422, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-41-5

Bd. 423 GÖTTE, R.-S.: Online-Schätzung von Modellgenauigkeiten zur automatischen Modelladaption unter Beibehaltung einer physikalisch-technischen Interpretierbarkeit. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 423, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-42-2

Bd. 424 PIERENKEMPER, C.: Systematik zur Entwicklung Leistungsstufen-basierter Industrie 4.0-Strategien. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 424, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-43-9

Bd. 425 DUMITRESCU, R.; HÖLZLE, K. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 18. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 5./6. Dezember 2024, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 425, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-44-6

Bd. 426 HESSE, M.: Interaktive Inbetriebnahme von Steuerungen und Regelungen für partiell bekannte dynamische Systeme mittels Gauß-Prozess-Regression. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 426, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-45-3

Bd. 427 PREUß, D.: Methodik zur automatisierten Extrahierung, Formalisierung und Handhabung von Änderungen technischer Anforderungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 427, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-46-0

Bd. 428 JUNKER, A.: Datengetriebene Modellbildung für nicht lineare mechatronische Systeme in Regelungstechnisch verwertbarer Form. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 428, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-47-7

Bd. 429 THIELE, H.: Technologievorausschau auf Basis mathematischer Modellierung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 429, Paderborn, 2025 – ISBN 978-3-947647-48-4

Bd. 430 TIMMERMANN, J., JUNKER, A., GÖTTE, R. S., HESSE, M., SCHWARZER, L.: DART - Datengetriebene Methoden in der Regelungstechnik. Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 432, Paderborn, 2025 – ISBN 978-3-947647-49-1

Bezugsadresse:
Heinz Nixdorf Institut
Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn



Für Unternehmen kommt es heute mehr denn je auf eine aktive Vorausschau und das frühzeitige Erkennen von Veränderungen, Trends und der Erfolgspotentiale von morgen an. Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches strategisches Agieren ist die geplante, systematische und phantasielose Antizipation der Entwicklungen von Märkten, Technologien und Geschäftsumfeldern (Branche, Zulieferer, Politik, Gesellschaft etc.). Diese Erkenntnisse in eine kohärente und umfassende Strategie zu übersetzen und umzusetzen, ist zentrale Kompetenz und Erfolgsfaktor.

Eine systematische Vorausschau verdeutlicht die Chancen, die im Schnittpunkt der zukünftigen Kunden- und Marktanforderungen (Market Pull) sowie der technologischen Möglichkeiten von morgen (Technology Push) liegen, aber auch die Bedrohungen für das etablierte Geschäft von heute. Damit ist die Basis für F&E-Aufträge und entsprechende Investitionsentscheidungen gelegt.

Mit dem Symposium für Vorausschau und Technologieplanung pflegen wir den gut etablierten Dialog mit der Fachwelt. Die Veranstaltung richtet sich an Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen aus Unternehmen, die sich mit der Gestaltung des Geschäfts von morgen befassen, sowie an maßgebende Persönlichkeiten aus einschlägigen Institutionen. Sie bietet ein anspruchsvolles Forum, in dem Fachleute aus Industrie und Wissenschaft ihre Arbeiten präsentieren und zur Diskussion stellen.