



**HOCHSCHULE
MITTWEIDA**
University of Applied Sciences

NextGen Scientific Review Vol. 4

Annual Perspectives on Next Generation Science



NextGen

Impressum

Herausgeberschaft:

Ramona Kusche,
Michael Spranger

NextGen Scientific Review

Annual Perspectives on Next Generation Science – Vol. 4

ISSN 2940-0929

Copyright Mittweida, Germany 2026: die jeweiligen Autor:innen
nextgen@hs-mittweida.de

Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk ist in allen Teilen urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Autor:innen unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen und Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Layout und Satz: Michael Spranger, Kerstin Strangfeld

Umschlagbild: erstellt mit Microsoft Copilot mit dem Prompt: abstraktes Bild zum Aufeinandertreffen der Wissenschaften in Orange, Pink, Blau, Grün und Schwarz

Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International CC BY-SA 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Verlag: Hochschulverlag Mittweida
D 09648 Mittweida
Technikumplatz 17
<https://verlag.hs-mittweida.de>



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Diese Maßnahme wird mit-
finanziert durch Steuermit-
tel auf der Grundlage des
vom Sächsischen Landtag
beschlossenen Haushaltes.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iv
Einleitung	v

Interdisziplinäre Beiträge aus NextGen

Modernisierung eines Prüfstands mit Kraft- und induktiver Wegsensorik durch ein flexibles und kostengünstiges Embedded-System <i>Hagen Bankwitz, Jörg Matthes</i>	2
The Relevance of Cultural Intelligence in Our Modern World: Implications for Intercultural Education - A Comprehensive Literature Review <i>Jill Deschner-Warner</i>	11
Objektive Bildqualitätsmessung in der Digitalforensik - MTF-basierte Quantifizierung der Bildqualität und erzielbarer Messgenauigkeit für forensische Bildanalysen <i>Marie Luise Heuschkel, Felix Fischer, Dirk Labudde</i>	17
Generative KI als Assistenz: Nutzungsperspektiven und Reflexionen der NextGen-Wissenschaftler:innen - Kompetente KI-Nutzung durch Peer-Learning in einem hochschulischen Qualifizierungsprogramm <i>Ramona Kusche, Karoline Buchner, Kerstin Strangfeld, Angela Freche</i>	25
Technische Lösungen für akademische Integrität: Potenziale und Grenzen des Safe Exam Browsers Sicherung fairer Prüfungsbedingungen durch Open-Source-Software <i>Bilyal Khassenov, Ramona Kusche</i>	35
How Mathematics Keeps Our Data Safe: The RSA Cryptosystem for Regular Numbers <i>Mandy Lange-Geisler, Klaus Dohmen</i>	44
Chancen & Herausforderungen von GenAI im Marketing <i>Monja Steinigke</i>	49
Metrology 4.0 and its central role in Industry 4.0 - A brief review <i>Flaviana Tagliaferri, Michael Kuhl, René Pleul</i>	58

Interdisziplinäre Gastbeiträge

Ökonomische Entwicklungspotenziale im Fußballstadion der Zukunft - Zur Rolle von Zielgruppenstrategien, Digitalisierung und nachhaltigen Nutzungskonzepten <i>Chris Alexander Braunstein</i>	65
Ein konzeptioneller Ansatz zur textbasierten Persönlichkeitsmodellierung für den Einsatz in der digitalen Forensik <i>Lorenz Dumanski, Michael Spranger</i>	70
Fachkulturen als Vergrößerungsglas von „gendered organizations“? - Eine Literaturanalyse über geschlechtlich substrukturierte Hochschulen <i>Franziska Stauche, Theresa Decker, Ramona Kusche</i>	76
Künstliche Intelligenz im Studium der Sozialen Arbeit in Sachsen - Nutzungskontexte und Wissensquellen <i>Julia Winterlich, Markus Lohse</i>	84

NextGen diskutiert

Between Promises and Hidden Complexities: The Sustainability - Challenges of Artificial Intelligence <i>Inga-Maria Eichentopf and Laura Seelig</i>	90
---	----

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

Sie halten hier den nunmehr 4. Sammelband des NextGen Projektes der Hochschule Mittweida in Ihren Händen. Es erwartet Sie eine spannende Lektüre mit verschiedenen interdisziplinären Artikeln von Nachwuchswissenschaftlern und Forschenden aus den unterschiedlichen Lehr- und Forschungsgebieten. Diese Mischung ist einmalig und zeigt die Bandbreite der unterschiedlichen Fachrichtungen und wissenschaftlichen Kompetenzen der Hochschule Mittweida. Ihnen wird ein Einblick in die Vielfalt der Methoden, Perspektiven und Persönlichkeiten gegeben, die sich im Rahmen von NextGen weiterentwickelt haben und zur Hochschule Mittweida gehören. Die Beiträge spiegeln nicht nur die fachliche Expertise wider, sondern zeigen auch die individuellen Entwicklungen der Menschen, die die Hochschule von morgen gestalten werden.

Denn das Projekt NextGen verfolgt ein zentrales Ziel: Die Stärkung des wissenschaftlichen Nachwuchses und die gezielte Entwicklung der Kompetenzen, die für eine Professur entscheidend sind – Forschung und Transfer, Lehre und Didaktik sowie Berufserfahrung und Praxis. Dabei versteht die Hochschule Mittweida Personalentwicklung als strategische Aufgabe. Die wichtigste Ressource sind die Menschen – sie gestalten die Hochschule und prägen ihre Kultur. Mit NextGen werden Talente gefördert und die eigenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter auf dem Weg zur Professur gestärkt. Es werden die persönlichen und fachlichen Voraussetzungen geschaffen, um den Nachwuchs langfristig an die Hochschule zu binden. So sichert die Hochschule Mittweida ihre Fachkräftebasis. Nur so kann auch in Zukunft gelehrt, geforscht und Wissen transferiert werden. Das Projekt schließt damit eine Lücke, die nicht nur für die Hochschule Mittweida wichtig, sondern für die Standortentwicklung der Region von Bedeutung ist. Es wird damit ein wichtiger Beitrag geleistet, um Kompetenzen und Wissen zur Gestaltung der Transformationsprozesse in Wirtschaft, Gesellschaft und Verwaltung zu nutzen.

Wissen ist die Voraussetzung für Weiterentwicklung. Die Beiträge in diesem Sammelband zeigen, wie Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler durch neue Ideen, praxisnahe Ansätze und den Willen, Verantwortung für die akademische und gesellschaftliche Entwicklung zu übernehmen, diese Zukunft mitgestalten.

Ein herzliches Dankeschön geht an alle Autorinnen und Autoren für ihre engagierte Arbeit sowie den beteiligten Lehrstühlen und Partnern für ihre Unterstützung. Die folgenden Beiträge laden dazu ein, Impulse für die eigenen Überlegungen und der Ausgangspunkt für Diskussionen zu sein – für eine Hochschule, die durch Menschen lebt und für eine Wirtschaft, die durch Innovation wächst.

Mit freundlichen Grüßen



Dr. Cindy Krause

Geschäftsführerin

IHK Chemnitz Regionalkammer Mittelsachsen

Einleitung

Herzlich willkommen zur vierten Ausgabe des NextGen Scientific Review. Auch in diesem Jahr präsentieren Wissenschaftler:innen aus dem NextGen-Qualifizierungsprogramm ihre aktuellen Forschungsergebnisse. Der Sammelband vereint technologische, pädagogische, soziale und ökonomische Perspektiven und verdeutlicht damit eindrucksvoll die gelebte Interdisziplinarität und Forschungsvielfalt des NextGen-Teams.

Das NextGen-Programm der Hochschule Mittweida unterstützt Wissenschaftler:innen auf ihrem Weg zur Professur an Hochschulen für Angewandte Wissenschaften und wird im Rahmen des vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) geförderten Projekts „FH-Personal“ umgesetzt. Seit 2021 fördert es innovative Forschungsansätze, praxisnahe Lehre und die nachhaltige Entwicklung wissenschaftlicher Karrieren.

Die Beiträge in dieser Ausgabe zeigen, wie eng technologische Innovation und gesellschaftliche Verantwortung miteinander verknüpft sind. Mehrere Arbeiten untersuchen die Potenziale und Grenzen Künstlicher Intelligenz – sei es in Bildung und Lehre, in der digitalen Forensik oder im Marketing. Andere Beiträge widmen sich den Herausforderungen nachhaltiger Digitalisierung, von ressourcenschonenden Messsystemen bis zur ökologischen Bewertung von KI-Anwendungen. Auch Aspekte akademischer Integrität, Diversität und kultureller Intelligenz verdeutlichen, dass Forschung immer im Spannungsfeld von Technologie, Ethik und sozialer Verantwortung steht.

Damit spannt der vierte Band des NextGen Scientific Review erneut einen Bogen zwischen naturwissenschaftlich-technischer Präzision, sozial-ökonomischen Fragestellungen und reflektierter Hochschulentwicklung. Er lädt dazu ein, das Zusammenspiel von Innovation, Verantwortung und nachhaltigem Fortschritt aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Perspektiven zu entdecken.

Im Folgenden werden die Beiträge knapp zusammengefasst dargestellt. Der Sammelband unterteilt sich in drei Abschnitte: Beiträge aus dem NextGen-Team, Gastbeiträge sowie die Kategorie „NextGen diskutiert“.

1 Interdisziplinäre Beiträge aus NextGen

Modernisierung eines Prüfstands mit Kraft- und induktiver Wegsensorik durch ein flexibles und kostengünstiges Embedded-System

Hagen Bankwitz, Jörg Matthes

Der Beitrag beschreibt die Modernisierung eines Prüfstands zur experimentellen Analyse mechanischer Größen durch ein flexibles und kostengünstiges Embedded-System. Die neue Systemarchitektur ermöglicht die einheitliche Messung und Auswertung unterschiedlicher Versuchsstände, reduziert Wartungsaufwand und erhöht die Interoperabilität. Das System zeichnet sich durch hohe Messgenauigkeit, modulare Software und geringe Herstellungskosten aus und dient als praxisnahes Beispiel für moderne sensorgestützte Messsysteme in der Lehre.

The Relevance of Cultural Intelligence in Our Modern World: Implications for Intercultural Education - A Comprehensive Literature Review

Jill Deschner-Warner

Der englischsprachige Beitrag untersucht die Rolle von Cultural Intelligence (CQ) als individuelle und institutionelle Kompetenz in interkultureller Bildung. Anhand internationaler Fallstudien wird gezeigt, wie CQ Lehrkräfteentwicklung, Studierendenbeteiligung und inklusive Didaktik fördern kann, zugleich aber durch fehlende Systemintegration und begrenzte Messbarkeit herausgefordert wird. Der Beitrag plädiert für eine stärkere Verankerung von CQ in Bildungsstrategien, um kulturelle Vielfalt nachhaltig zu fördern.

Objektive Bildqualitätsmessung in der Digitalforensik - MTF-basierte Quantifizierung der Bildqualität und erzielbarer Messgenauigkeit für forensische Bildanalysen

Marie Luise Heuschkel, Felix Fischer, Dirk Labudde

Diese Studie stellt einen systematischen Ansatz zur objektiven Bewertung der Bildqualität in bildgestützten digitalforensischen Verfahren vor, bei dem die Modulation Transfer Function (MTF) als zentrales Maß dient. Durch experimentelle MTF-Messungen und präzise Kantenlokalisierung wird gezeigt, wie die methodisch bestimmte Bildqualität und Messgenauigkeit die Gerichtsverwertbarkeit forensischer Bildanalysen erhöht und subjektive Einschätzungen durch nachvollziehbare Standards ersetzt.

Generative KI als Assistenz: Nutzungsperspektiven und Reflexionen der NextGen-Wissenschaftler:innen - Kompetente KI-Nutzung durch Peer-Learning in einem hochschulischen Qualifizierungsprogramm

Ramona Kusche, Karoline Buchner, Kerstin Strangfeld, Angela Freche

Der Beitrag untersucht anhand von Interviews mit Promovierenden und Postdocs, wie generative KI-Werkzeuge im Hochschulalltag eingesetzt werden, welche Nutzungsmuster auftreten und welche Kompetenzen dabei erforderlich sind. Die Ergebnisse zeigen, dass erfahrene Nutzer:innen KI-Tools strategisch und kritisch nutzen, aber die Vermittlung eines reflektierten Assistenzverständnisses an Studierende noch eine große Herausforderung darstellt. Peer-Learning, insbesondere durch spezielle KI-Peer-Group-Sessions, wird als wichtiges Format zur gemeinsamen Erprobung und Reflexion hervorgehoben.

Technische Lösungen für akademische Integrität: Potenziale und Grenzen des Safe Exam Browsers - Sicherung fairer Prüfungsbedingungen durch Open-Source-Software

Bilyal Khassenov, Ramona Kusche

Im Mittelpunkt des Beitrags steht die Untersuchung technischer Maßnahmen zur Wahrung von Integrität bei digitalen Prüfungen, insbesondere im Kontext neuer Herausforderungen durch KI-gestützte Täuschungsversuche. Es wird gezeigt, dass der Safe Exam Browser durch technische Maßnahmen wie Zugriffsbeschränkungen und Datenschutzkonformität einen wichtigen Beitrag zur Prävention leistet, dessen Grenzen jedoch durch ergänzende pädagogische und kommunikative Strategien überwunden werden müssen.

How Mathematics Keeps Our Data Safe: The RSA Cryptosystem for Regular Numbers

Mandy Lange-Geisler, Klaus Dohmen

Der englischsprachige Beitrag vermittelt grundlegendes Verständnis für modulare Arithmetik als mathematische Basis moderner Kryptographie. Er befasst sich insbesondere mit dem RSA-Kryptosystem und der kürzlich entwickelten Verallgemeinerung für mehrere Primzahlen und Potenzen für moduli $n > 1$. Der Beitrag zeigt, dass die scheinbare Einschränkung des Nachrichtenraums auf modulo n in der Praxis kaum relevant und somit vernachlässigbar ist.

Chancen & Herausforderungen von GenAI im Marketing

Monja Steinigke

Der Artikel analysiert den Einsatz generativer künstlicher Intelligenz (GenAI) im Marketing. Er zeigt auf, dass GenAI zu hohen Effizienzsteigerungen und Wettbewerbsvorteilen führt. Die strukturierte Betrachtung anhand des TOE-Frameworks verdeutlicht jedoch auch, dass Fehleranfälligkeit, Datenschutzprobleme und Akzeptanzbarrieren zentrale Herausforderungen bei der Nutzung dieser Technologie im Marketing darstellen.

Metrology 4.0 and its central role in Industry 4.0 - A brief review

Flaviana Tagliaferri, Michael Kuhl, René Pleul

Der englischsprachige Artikel befasst sich mit der Beschreibung von Metrology 4.0 als Integration metrologischer Methoden in intelligente Fertigungsumgebungen. Durch den Einsatz vernetzter Sensoren, KI, digitaler Zwillinge und cloud-basierter Dienste ermöglicht Metrology 4.0 Echtzeit-Qualitätskontrolle, verbesserte Produktivität und innovative Zusammenarbeit. Gleichzeitig thematisiert der Beitrag Herausforderungen wie Datensicherheit, Interoperabilität und Modelltransparenz und hebt die zentrale Rolle von Metrology 4.0 als Grundlage für Industry 5.0 hervor.

2 Interdisziplinäre Gastbeiträge

Für die vierte Ausgabe des NextGen Scientific Review wurden vier Gastbeiträge eingereicht:

Ökonomische Entwicklungspotenziale im Fußballstadion der Zukunft - Zur Rolle von Zielgruppenstrategien, Digitalisierung und nachhaltigen Nutzungskonzepten

Chris Alexander Braunstein

Der Beitrag untersucht ökonomische Entwicklungsstrategien moderner Fußballstadien und hebt die Bedeutung von Zielgruppenorientierung, Digitalisierung und nachhaltiger Mantelnutzung für die Erschließung neuer Ertragsquellen hervor. Die qualitative Studie und Befragung von Expert:innen zeigen, dass die wirtschaftliche Zukunftsfähigkeit von Stadien vor allem von ihrer Wandlung zu vernetzten, multifunktionalen Erlebnis- und Wirtschaftsräumen abhängt, in denen digitale und maßgeschneiderte Angebote zentrale Rollen spielen.

Ein konzeptioneller Ansatz zur textbasierten Persönlichkeitsmodellierung für den Einsatz in der digitalen Forensik

Lorenz Dumanski, Michael Spranger

Das Konzeptpapier stellt einen Ansatz zur digitalen Persönlichkeitsmodellierung in der forensischen Datenanalyse vor, um relevante Akteur:innen in umfangreichen Kommunikationsdaten effizienter zu identifizieren. Durch die Verknüpfung psychometrischer Modelle mit sprachbasierten Analysen soll Kommunikationsverhalten so interpretiert werden, dass daraus Hinweise auf Persönlichkeitseigenschaften und Priorisierungsstrategien in Ermittlungsverfahren abgeleitet werden können.

Fachkulturen als Vergrößerungsglas von „gendered organizations“? - Eine Literaturanalyse über geschlechtlich substrukturierte Hochschulen

Franziska Stauche, Theresa Decker, Ramona Kusche

Dieser Beitrag untersucht, wie implizite geschlechtliche Hierarchien und Ungleichheitsmechanismen innerhalb von Hochschulen Frauen und andere marginalisierte Gruppen benachteiligen. Die systematische Analyse verschiedener Fachkulturen zeigt, dass diese Mechanismen in allen wissenschaftlichen Disziplinen präsent, aber unterschiedlich ausgeprägt sind. Es wird betont, dass vertiefende Forschung notwendig ist, um diese Ungleichheitsstrukturen besser zu erkennen und sichtbar zu machen.

Künstliche Intelligenz im Studium der Sozialen Arbeit in Sachsen - Nutzungskontexte und Wissensquellen

Julia Winterlich, Markus Lohse

Die Studie untersucht, wie Studierende der Sozialen Arbeit KI-Anwendungen nutzen und sich Wissen darüber aneignen. Die Ergebnisse zeigen, dass KI vor allem punktuell zur Textarbeit und Recherche eingesetzt wird, während Wissen dazu überwiegend informell über Peers und Onlinequellen erworben wird. Daraus leitet sich die Notwendigkeit ab, gezielte didaktische Konzepte zur Förderung von KI-Kompetenz im Studium zu etablieren.

3 NextGen diskutiert

Auch in Ausgabe vier gibt es die Rubrik „NextGen diskutiert“. Beiträge dieser Rubrik stellen Essays dar, in denen die Autor:innen aktuelle Themen aus Wissenschaft und Gesellschaft kontrovers diskutieren. Der diesjährige Beitrag durchlief alle internen Reviewschleifen, ging aber nicht in ein externes Review.

Between Promises and Hidden Complexities: The Sustainability - Challenges of Artificial Intelligence

Inga-Maria Eichentopf and Laura Seelig

Der englischsprachige Artikel analysiert die duale Rolle von Künstlicher Intelligenz (KI) im Kontext nachhaltiger Entwicklung, indem er KI-Einsätze zur Förderung der Nachhaltigkeit sowie die ökologischen und sozialen Auswirkungen des KI-Lebenszyklus untersucht. Er betont, dass kurzfristige Vorteile nicht automatisch Nachhaltigkeit bedeuten, und hebt Umweltkosten, Ressourcenverbrauch und soziale Ungleichheiten hervor. Nachhaltigkeit von KI wird nur dann erreicht, wenn sie sowohl nachhaltige Ziele fördert als auch strenge Lebenszyklusanforderungen erfüllt; andernfalls sollten kleinere Modelle oder der Verzicht auf KI in Betracht gezogen werden.

Seit Ausgabe Eins findet sich ein KI generiertes Bild auf dem Cover des NextGen Scientific Review, dass die Charakteristika von NextGen symbolisiert. Die Auswahl des Covers erfolgt im NextGen Team und wurde in diesem Jahr mit Microsoft Copilot erstellt.

Alle Beiträge dieses Bandes wurden einem sorgfältigen und mehrstufigen Begutachtungsverfahren unterzogen. Neben den internen wissenschaftlichen, redaktionellen und gestalterischen Prüfungen fand eine externe fachliche Bewertung durch Expert:innen des jeweiligen Themenfeldes statt. Beiträge in der Rubrik „NextGen diskutiert“ durchlaufen nicht zwingend ein externes Review.

Unser besonderer Dank gilt den Autor:innen, den engagierten Gutachter:innen sowie dem Redaktionsteam, deren Einsatz und Expertise diesen vielfältigen Sammelband ermöglicht haben.

Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre und viele neue Perspektiven beim Lesen der Beiträge.

Externe Gutachter:innen des NextGen Scientific Review Vol. 4 waren:

Prof.in Dr.in Delia Balaban, Prof.in Dr.in Tanja Carstensen, Prof. Dr. Marcel Dulgeridis, Prof. Silvio Genna, Prof. Dr. rer. nat. habil. Thomas Kalinowski, Prof. Dr. Thomas Köhler, Prof. Dr. Alexander Marbach, Ass. Prof.in Meda Mucundorfeanu, Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel, Dr.in Anja Schulz, Prof.in Dr.in Melanie Siegel, Dr.in Feline Zoicher

1

Interdisziplinäre Beiträge aus NextGen

Modernisierung eines Prüfstands mit Kraft- und induktiver Wegsensorik durch ein flexibles und kostengünstiges Embedded-System

Hagen Bankwitz, Jörg Matthes

Kontakt: Hagen Bankwitz, Hochschule Mittweida, bankwitz@hs-mittweida.de

Zusammenfassung

Im Rahmen der Digitalisierung und Modularisierung ingenieurwissenschaftlicher Lehrmittel wurde ein vorhandener Prüfstand zur Erfassung mechanischer Größen umfassend modernisiert. Das zentrale Ziel bestand in der Entwicklung einer zukunftssicheren, hardware- und betriebssystemunabhängigen Systemarchitektur, die den Betrieb unterschiedlicher Versuchsstände über eine einheitliche Mess- und Auswertplattform ermöglicht. Dies reduziert den Betreuungs- und Wartungsaufwand und erhöht die Interoperabilität zwischen Experimentiersystemen.

Der Prüfstand dient der experimentellen Analyse der elastischen Wellenverformung unter radialer Krafteinwirkung. Die Messdatenerfassung erfolgt mittels einer DMS-basierten Kraftmessdose und eines induktiven Wegaufnehmers. Die Signalaufbereitung umfasst einen HX711-AD-Wandler zur hochauflösenden Digitalisierung der Kraftmessung sowie eine analoge Trägerschaltung mit True-RMS-Wandler für das Wegsignal. Die zentrale Datenerfassung und -übertragung erfolgt über ein Embedded-System vom Typ ESP32.

Eine neu entwickelte Software, die sich durch Modularität und Erweiterbarkeit auszeichnet, ermöglicht die Visualisierung in Echtzeit sowie weiterführende Datenanalysen. Zudem lässt sie sich flexibel an unterschiedliche Lehr- und Forschungsanforderungen anpassen. Das resultierende System zeichnet sich durch hohe Messgenauigkeit, robuste Architektur und geringe Herstellungskosten aus und bietet ein praxisnahes Demonstrationsbeispiel für moderne sensorgestützte Messsysteme in der ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung.

Keywords: Prüfstandmodernisierung, Kraftsensorik (DMS, HX711), Induktive Wegsensorik, Echtzeit-Datenvisualisierung, Open-Source-Messsoftware, Digitale Messtechnik.

1 Einführung

Prüfstände werden im Hochschul- und Forschungsumfeld häufig über einen Zeitraum von vielen Jahren genutzt. Mechanische Komponenten und Sensoren zeichnen sich zwar durch Langlebigkeit und Funktionalität aus, doch die veraltete Mess- und Steuerungssoftware stellt ein wiederkehrendes Problem dar. Um die Kompatibilität mit neuen Betriebssystemversionen zu gewährleisten und einen sicheren Betrieb zu ermöglichen, ist eine regelmäßige Aktualisierung der Software erforderlich (HIS-HE, 2008). Des Weiteren sind kommerzielle Messsysteme in der Regel proprietär, mit hohen Anschaffungskosten verbunden und bieten nur begrenzte Anpassungsmöglichkeiten an individuelle Anforderungen (Rein, 2008). Speziell im Hochschulbereich zeigen sich diese Herausfor-

derungen. Einerseits sind die finanziellen Mittel begrenzt, andererseits besteht ein hoher Bedarf an flexiblen und anpassbaren Lösungen für Lehre und Forschung (HIS-HE, 2008). Die Notwendigkeit, bestehende Strukturen und Systeme regelmäßig an neue Anforderungen und technische Entwicklungen anzupassen, ist ein zentrales Element des lebenszyklusorientierten Managements an Hochschulen (Rein, 2008).

In Anbetracht der zuvor dargelegten Sachverhalte erfährt die Modernisierung bestehender Prüfstände durch den Einsatz kostengünstiger, modularer Open-Source-Hardware und -Software eine Steigerung ihrer Relevanz. Das Ziel besteht in der Entwicklung offener, flexibler und kosteneffizienter Messlösungen, die unabhängig von proprietärer Software funktionieren, sich leicht in bestehende Systeme integrieren lassen und die Bedienung sowie Anpassung im Hochschulbetrieb vereinfachen (HIS-HE, 2008).

Der in dieser Arbeit untersuchte Prüfstand ist ein integraler Bestandteil des Maschinenbaustudiums an der Hochschule Mittweida. Die primäre Funktion des Prüfstands besteht in der Messung der Durchbiegung von Wellen in Abhängigkeit von der Kraft. Im Rahmen des Experiments wird eine vorgegebene Kraft manuell aufgebracht und gemessen sowie die resultierende Durchbiegung mithilfe eines induktiven Wegsensors erfasst. Die Modernisierung zielt darauf ab, das System zukunftsfähig und unabhängig von Änderungen im Betriebssystem der verwendeten Rechner zu gestalten, um eine effizientere Nutzung für zukünftige Lehrveranstaltungen zu ermöglichen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, gleichartige Versuchsanordnungen mit ähnlicher Hardware und Software zu betreiben.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Validierung eines kosteneffizienten Embedded-Systems zur präzisen Kraft- und Wegmessung. Im ersten Abschnitt erfolgt die Beschreibung des Aufbaus des zentralen Prüfstands, welcher für die Analyse von Kraft-Verformungs-Zusammenhängen konzipiert wurde. Das untersuchte System integriert einen Hydraulikzylinder, DMS-basierte Kraftsensoren und einen induktiven Wegsensor.

Im Anschluss erfolgt die Vorstellung der eingesetzten Sensoren. Im zweiten Abschnitt wird die Funktionsweise von DMS-basierten Kraftsensoren erörtert. Im dritten Abschnitt werden induktive Wegsensoren nach dem Viertel-differenzialprinzip mit behandelt.

Die Datenerfassung und -verarbeitung (Abschnitt 3) erfolgt über einen ESP32-Mikrocontroller und den HX711-AD-Wandler, ergänzt durch die Digitalisierung der Wegsignale. Die in Abschnitt 4 entwickelte C#/NET-Software ermöglicht Steuerung, Datenerfassung und Visualisierung.

In Abschnitt 5 wird die experimentelle Validierung durch

einen Vergleich mit Referenzsensoren präsentiert. Der sechste Abschnitt fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf potenzielle Weiterentwicklungen.

2 Stand der Technik

Prüfstände zur Messung mechanischer Größen wie Kraft und Weg sind zentrale Elemente in Forschung und Lehre, da sie die Grundlage für das Verständnis und die Analyse mechanischer Zusammenhänge bilden. Sie ermöglichen die experimentelle Untersuchung von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen unter realitätsnahen Bedingungen und dienen sowohl der Validierung theoretischer Modelle als auch der Entwicklung innovativer technischer Lösungen.

Das hier verwendete System besteht messtechnisch aus einem Kraft- und einem Wegsensor. Für die Messung werden die Messverstärkerschaltungen beider Sensoren sowie eine Analog-Digital-Wandlung benötigt. Darüber hinaus ist eine Software zur Interpretation und Auswertung der Messsignale erforderlich.

2.1 Kraftmessung mit DMS-Sensoren

Ein Dehnungsmessstreifen (DMS) ist ein Sensor, der mechanische Dehnung an der Oberfläche eines Bauteils in eine Änderung des elektrischen Widerstands umwandelt. Dieses Prinzip basiert auf der Geometrieabhängigkeit des elektrischen Widerstands: Verformt eine äußere Kraft oder ein Moment das Bauteil, auf dem der DMS appliziert ist, so verändert sich dessen Länge und damit der elektrische Widerstand des Messgitters (Keil, 2017).

Die dabei auftretenden sehr kleinen Widerstandsänderungen werden üblicherweise in Wheatstone'schen Brückenschaltungen ausgewertet. Um Kräfte und Momente messen zu können, werden DMS in einer geeigneten Geometrie, zum Beispiel Biegebalken, Schubscheiben oder Ringkörpern, angebracht und so verschaltet, dass sich die Kraft- oder Momentenkomponenten direkt aus den gemessenen Dehnungen mittels des Hooke'schem Gesetz ableiten lassen (Keil, 2017; Kuttner & Rohnen, 2019).

In Abbildung 1 werden einige beispielhafte Sensorbauformen zur Ermittlung von Kräften dargestellt.

DMS-basierte Kraftsensoren zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit, geringe Hysterese und gute Temperaturkompensation aus, insbesondere bei Betrieb in Halb- oder Vollbrückenanordnungen (Kuttner & Rohnen, 2019). Die Eichung solcher Kraftaufnehmer erfolgt durch Vergleich mit bekannten Gewichtskräften oder Referenzsensoren. Mögliche Anwendungsbereiche sind Materialprüfmaschinen, Automobiltests, biomedizinische Anwendungen und studentische Ausbildung.

2.2 Wegmessung mittels induktiver Viertelbrücke (Differentialdrossel-Prinzip)

Bei der induktiven Wegmessung nach dem Differentialdrossel-Prinzip, siehe Abbildung 2, wird die durch die Bewegung eines ferromagnetischen Kerns 1 in einer Spulen-anordnung 2 entstehende Veränderung der Induktivität genutzt. Die Induktivität einer Spule hängt dabei vom Luftspalt ab, d. h., sie ist von der relativen Position zwischen Spule und Kern abhängig. Eine Bewegung des Kerns

führt zu einer Änderung des magnetischen Flusses und somit zu einer messbaren Änderung der Induktivität (Czechowicz, 2014).

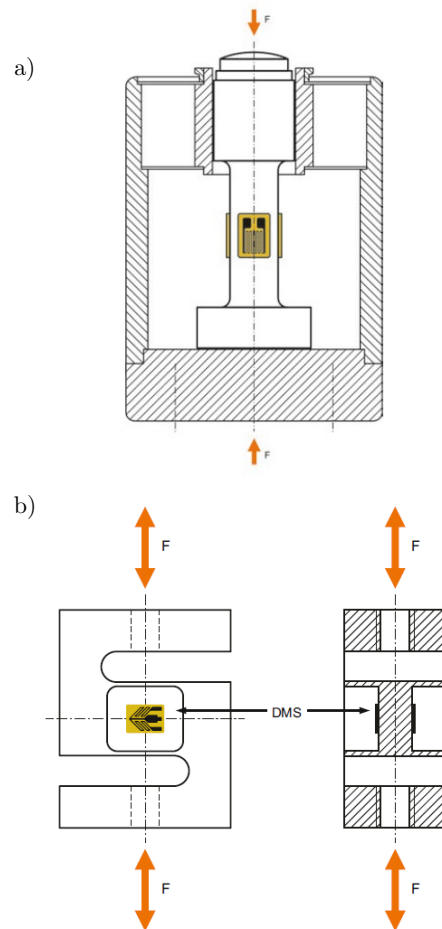


Abbildung 1: Kraftaufnehmer a) Ausführung mit zylindrischem Verformungselement (Kraftmessdose).

Da der Zusammenhang zwischen Weg und Induktivität nichtlinear ist, wird zur Linearisierung des Ausgangssignals das Differentialdrossel-Prinzip genutzt. Dabei kommen zwei gegensinnig wirkende Spulen zum Einsatz, deren induzierte Spannungen sich bei mittiger Kernposition gegenseitig aufheben. Bei einer Verschiebung entsteht eine Differenzspannung, die im zentralen Arbeitsbereich näherungsweise, linear zur Wegänderung ist (Kuttner & Rohnen, 2019; Czechowicz, 2014).

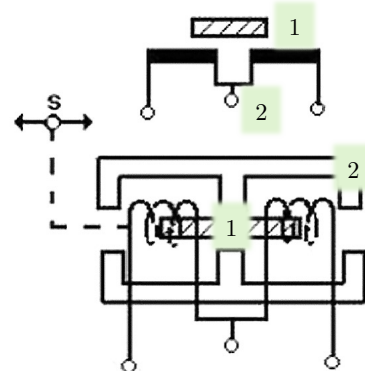


Abbildung 2: Funktionsweise des Differentialdrossel-Prinzips [Messtron].

Zur Störunterdrückung werden diese Sensoren mit einem Trägerfrequenz-Messverstärker betrieben. Dieser moduliert das Sensorsignal mit einer hochfrequenten Wechselspannung, zum Beispiel im kHz-Bereich. Dadurch werden niederfrequente Störungen wie Thermospannungen oder elektromagnetische Einflüsse effektiv unterdrückt (Czechowicz, 2014; Keil, 2017).

Eine einfache Viertelbrückenschaltung, bei der lediglich eine variable Induktivität verwendet wird, ermöglicht jedoch keine vollständige Kompensation symmetrischer Fehler. Sie werden daher vor allem in weniger anspruchsvollen Anwendungen eingesetzt. Für präzisere Messungen finden dagegen Halb- oder Vollbrückenanordnungen Anwendung, die eine höhere Linearität und Empfindlichkeit bieten (Keil, 2017).

2.3 Messbrücke

Messbrücken sind eine etablierte Methode zur präzisen Erfassung physikalischer Größen wie Dehnung, Temperatur oder elektrischer Widerstand. Sie kommen insbesondere in der experimentellen Mechanik, Sensorik und Strukturüberwachung zum Einsatz. Die gebräuchlichste Variante ist die nach ihrem Entwickler Charles Wheatstone benannte Wheatstone-Brücke. Ursprünglich wurde sie zur Messung unbekannter Widerstände konzipiert (Wheatstone, 1843). In der modernen Messtechnik wird sie vorrangig zur Differenzmessung geringfügiger Widerstandsänderungen genutzt, wie sie beispielsweise bei Dehnungsmessstreifen auftreten (Rothbucher, 2017).

Ein klassisches Anwendungsfeld ist die Materialprüfung, bei der mechanische Beanspruchungen mithilfe von DMS detektiert werden. Diese werden in Viertel-, Halb- oder Vollbrückenschaltungen integriert. Während Halb- und Viertelbrücken für weniger komplexe Anwendungen ausreichen, bieten Vollbrücken den Vorteil der Temperaturkompensation, Richtungsselektivität und einer höheren Messempfindlichkeit (Rothbucher, 2017).

Mit dem Fortschritt in der Elektronik haben sich auch die Auswertverfahren für Brückensignale verbessert. Moderne Instrumentenverstärker mit hoher Gleichtaktunterdrückung ermöglichen die präzise Erfassung der geringen Ausgangssignale im Millivoltbereich (Fraden, 2010).

Zusätzlich tragen hochauflösende Analog-Digital-Wandler mit integrierter Rauschfilterung zu einer stabilen digitalen Messwertverarbeitung bei, selbst unter rauen Umgebungsbedingungen (National Instruments, 2020).

Ein innovativer Fortschritt ist die Integration von Messbrücken in strukturintegrierte oder drahtlose Sensoren. Solche Systeme werden beispielsweise auf flexiblen Substraten gedruckt oder direkt in Faserverbundwerkstoffe eingebettet. Dadurch ergeben sich neue Anwendungsfelder in der Medizintechnik, Robotik und Forensik (Jung, Kim, Lee & Lee, 2019). Die Miniaturisierung dieser Sensoren fördert zudem ihre Verwendung in mobilen und tragbaren Systemen.

2.4 Integration in Embedded-Systeme (ESP32 + HX711)

Der ESP32 ist ein leistungsstarker System-on-Chip-(SoC)-Mikrocontroller von Espressif Systems mit integriertem Wi-Fi 802.11 b/g/n sowie Dual-Mode-Bluetooth 4.2. Er

verfügt über zwei Tensilica-LX6-CPU-Kerne mit einer Taktfrequenz von bis zu 240 MHz, 520 KB On-Chip-SRAM, bis zu 36 GPIO-Pins, 16 PWM-Kanäle und einen Flash-Speicher von bis zu 4 MB (Espressif Systems, 2023). Aufgrund seiner leistungsfähigen Architektur eignet er sich besonders für eingebettete Systeme in den Bereichen Internet der Dinge (IoT) und Smart-Home-Automation sowie für diverse Überwachungs- und Steuerungsanwendungen (Alfaris et al., 2020; Rajasekaran et al., 2021).

Typische Einsatzgebiete umfassen die Erfassung und Verarbeitung von Sensordaten, die anschließend per WLAN oder Bluetooth an zentrale Systeme weitergeleitet werden. Eine Datenübermittlung per USB-Schnittstelle ist ebenso möglich, welche gleichzeitig auch die Spannungsversorgung für den Microcontroller übernehmen kann. Entscheidend für die Popularität des ESP32 (Espressif Systems, 2023; Santos & Santos, 2020) sind die hohe Flexibilität, die breite Protokollunterstützung und die Kosteneffizienz. Für die Softwareentwicklung stehen verschiedene Plattformen zur Verfügung, darunter „Arduino Core for ESP32“, „Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF)“ und „MicroPython“.

Der HX711 ist ein spezialisierter 24-Bit-Analog-Digital-Wandler (ADC), der für das Auslesen von Brückenschaltungen konzipiert wurde. Insbesondere findet er Anwendung beim Auslesen von Wheatstone-Brücken in Wägezellen bzw. Kraft- und Momentsensoren. Er verfügt über zwei Eingangskanäle. Während Kanal A über eine wählbare Verstärkung von 128 oder 64 verfügt, hat Kanal B eine feste Verstärkung von 32 (Avia Semiconductor, 2014). Der HX711 beinhaltet einen rauscharmen Verstärker und einen On-Chip-Spannungsregler, wodurch eine stabile Signalverarbeitung gewährleistet wird. Die Datenübertragung erfolgt seriell über eine Zwei-Draht-Schnittstelle. Die Abtastrate kann auf 10 oder 80 Samples pro Sekunde eingestellt werden. Der HX711 zeichnet sich durch seine Fähigkeit aus, Netzstörungen zu unterdrücken, und weist einen geringen Stromverbrauch auf. Das macht ihn ideal für batteriebetriebene Messsysteme (Kumar et al., 2021; Singh, 2019).

2.5 Open source Auswertungssoftware

In den letzten Jahren hat sich Open-Source-Messsoftware zu einer wichtigen Alternative zu kommerziellen Lösungen entwickelt, insbesondere in Forschungs- und Entwicklungsumgebungen sowie in der Lehre. Diese Softwarelösungen zeichnen sich vor allem durch Kostenfreiheit, Flexibilität und Anpassbarkeit aus. Der Quellcode ist offen zugänglich und wird von einer Community weiterentwickelt. Typische Funktionen moderner Open-Source-Messsoftware umfassen die Unterstützung einer Vielzahl von Schnittstellen zur Datenakquise, beispielsweise USB, serielle Schnittstellen, Ethernet oder drahtlose Verbindungen. Dadurch eignet sich die Software für den Einsatz mit unterschiedlichsten Sensoren und Messgeräten. Neben der Erfassung mehrerer Messkanäle bieten viele Programme eine Echtzeit-Datenvisualisierung in Form von dynamischen Kurvendiagrammen oder Spektralanalysen. Darüber hinaus verfügen sie häufig über umfangreiche Datenspeichermöglichkeiten in Formaten wie CSV, JSON oder HDF5 sowie über integrierte Analysewerkzeuge zur Signalverarbeitung, statistischen Auswertung und Trendanalyse (Sigrok Project, 2024).

Ein weiterer wichtiger Trend ist die Integration von Skriptsprachen wie Python oder Lua. Diese ermöglichen die Automatisierung von Messabläufen sowie eine einfache Erweiterbarkeit der Software. Besonders beliebt sind Python-basierte Frameworks wie PyMeasure, da sie eine modulare und plattformübergreifende Programmierung bieten. Die zunehmende Nutzung webbasierter Interfaces erlaubt zudem den Zugriff auf Messsysteme über den Browser und vereinfacht somit die Bedienung und Fernwartung (PyMeasure, 2023; Sigrok Project, 2024). Im Bereich der wissenschaftlichen Datenanalyse stellt die kostenfreie Software QtiPlot eine Alternative zu etablierten kommerziellen Programmen dar. Sie wird vor allem in der akademischen Forschung eingesetzt (QtiPlot, 2023).

Die Open-Source-Messsoftware ermöglicht eine zunehmende Integration von Cloud-Diensten. Dadurch lassen sich große Datenmengen effizient speichern und analysieren. Zudem kommen KI-gestützte Methoden zur automatischen Mustererkennung und Fehlerdiagnose zum Einsatz. Diese Entwicklungen fördern die Nutzung modularer Hardwarelösungen, die sich flexibel an verschiedene Messaufgaben anpassen lassen und mittels Plug-and-Play kompatibel sind (OpenDAQ, 2023; Open Ephys, 2024). Insgesamt zeigt sich somit, dass Open-Source-Lösungen im Bereich der Messsoftware immer leistungsfähiger werden. Aufgrund ihrer Offenheit sind sie insbesondere für individuelle Anforderungen in Forschung und Lehre eine attraktive Option.

3 Systemarchitektur

3.1 Prüfstands Aufbau

Der zu modernisierende Prüfstand dient der Erfassung der Verformung einer Welle infolge einer punktuellen Krafteinwirkung an einer definierten Position. Der Aufbau des Prüfstands wird in Abbildung 3 veranschaulicht. Die Kraft wird über einen Hydraulikzylinder 1 zielgerichtet in die Welle 3 eingeleitet, die in einem Prisma 5 gelagert ist. Die einwirkende Kraft führt zu einer elastischen oder plastischen Deformation / Dehnung, die in Abhängigkeit zur Belastung variiert. Zur Erfassung der vorgenannten Verformung wird ein induktiver Wegaufnehmer 4 verwendet, der die Relativbewegung an der Messstelle erfasst. Die Messung der Kraft erfolgt simultan mittels einer Kraftmessdose 2. Dies ermöglicht die Analyse von Kraft-Verformungs-Zusammenhängen in hoher zeitlicher Auflösung.

3.1 Kraftsensorik

Zur Messung der eingepprägten Kraft kommt eine Kraftmessdose mit einem Nennwert von 10 kN zum Einsatz. Diese verfügt über eine DMS-Vollbrücke mit einem Kennwert des Sensors von 2 mV/V. Dieser Kennwert beschreibt die Empfindlichkeit des Sensors und gibt an, wie hoch die Ausgangsspannung im Verhältnis zur Versorgungsspannung ist, wenn der Sensor mit seiner Nennkraft belastet wird.

Da die Messbrücke unter Belastung jedoch nur eine geringe Ausgangsspannung von wenigen Millivolt aufweist, ist eine Verstärkung notwendig. Zudem muss die Analogspannung in einen digitalen Wert gewandelt werden, um

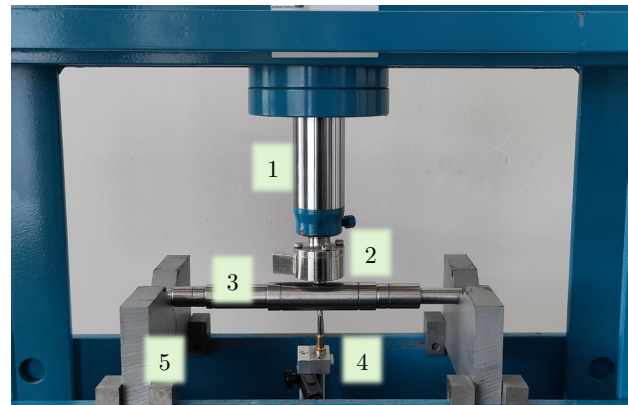


Abbildung 3: Prüfstands Aufbau.

diesen mit einem Computer weiterverarbeiten zu können. Hierfür wurde ein HX711-Board verwendet. Die Versorgung des Sensors erfolgt mit einer Spannung von 3,3 V, sodass die resultierende Ausgangsspannung bei Erreichen des Nennwerts des Sensors 6,6 mV beträgt. Durch Nutzung des im HX711 verbauten Verstärkers wird dieses Signal um den Faktor 128 verstärkt. Somit wird eine Ausgangsspannung nach dem Verstärker von über 800 mV realisiert, die anschließend vorzeichenbehaftet mit 23 Bit (3,3 V) digitalisiert wird. Somit sind ca. 21 Bit für die Erfassung des Messsignals als effektive Auflösung verfügbar. Das entspricht einer Auflösung von 0,004 N. Die resultierende Auflösung ist demnach signifikant besser als die Messgenauigkeit des verwendeten Sensors von 0,1% vom Nennwert (10 N), die für eine möglichst genaue Messung erforderlich ist.

3.2 Wegsensorik

Für die Messung der resultierenden Deformation der Welle kommt eine induktive Wegmessung nach dem Prinzip einer Viertelbrücke zum Einsatz. Diese basiert auf dem Differentialdrossel-Prinzip und wird intern zur Vollbrücke ergänzt. Der Nennmessweg beträgt 10 mm bei einem Nennkennwert von 80 mV/V.

Um die Funktion des Sensors zu gewährleisten, muss die integrierte Messbrücke mit einer Wechselspannung beaufschlagt werden. Laut Datenblatt soll diese 4,8 kHz betragen und in einem Effektivspannungsbereich von 0,5 bis 10 V liegen. Hierzu wurde eine neue Schaltung entwickelt. Basis der Schaltung ist eine 5-V-Gleichspannungsstromversorgung über USB. Für die notwendige Frequenz von 4,8 kHz wurde ein Wien-Robinson-Oszillator erstellt. Da keine negative Spannung zur Verfügung stand, wurde zunächst eine Gleichspannung von 2,3 V erzeugt, über die die Wechselspannung oszilliert. Der ideale Wert wäre 2,5 V. Da die verbauten OPVs aber in den Grenzbereich kamen, wurde die Spannung entsprechend reduziert. Dies wurde durch einen einfachen Spannungsteiler in Kombination mit einem Impedanzwandler erreicht (siehe Abbildung 4 links). Mit der erzeugten Gleichspannung wurde der Oszillator auf die notwendige Frequenz dimensioniert. Am Ausgang des Oszillators wurde zusätzlich ein Impedanzwandler angeordnet, um die nachfolgende Messbrücke nicht zu beeinflussen bzw. zu verstimmen (HBM, 2021).

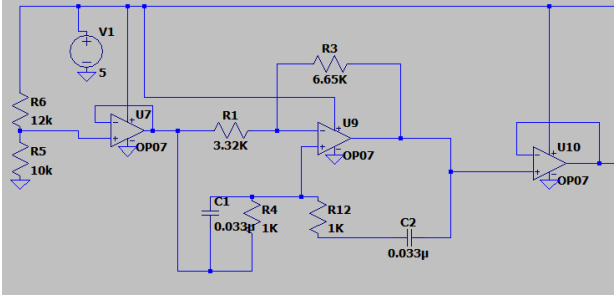


Abbildung 4: Schaltplan.

Die Schaltung wurde vorab transient in der Software LT-Spice simuliert. Die zeitlichen Verläufe der Spannung sind in Abbildung 5 oben dargestellt. Nach einer kurzen Einschwingphase wurde ein stabiles Signal erzeugt, das einem geforderten Sinus sehr nahekommt, siehe Abbildung 5 unten. Die erzeugte Wechselspannung wurde zur Bestromung der Messbrücke des Wegsensors genutzt. Der Ausgang der Messbrücke liefert eine maximale Wechselspannung von 10 mV für den Nennwert des Sensors. Dieser Wert kann jedoch nicht direkt weiterverarbeitet werden, da ein AD-Wandler nur Gleichspannungssignale wandeln kann. Deshalb wurde das hochfrequente Wechselspannungssignal mithilfe eines RMS-Wandlers in ein Gleichspannungssignal umgewandelt. Dieses Signal wird zunächst 128-fach verstärkt und anschließend mit dem HX711 digitalisiert. Die maximale Ausgangsspannung des RMS-Wandlers beträgt ca. 7 mV. Nach der Verstärkung von 900 mV beträgt die Auflösung somit etwa 21 Bit, was einer nominellen Auflösung von 0,005 μm entspricht. Der verwendete Sensor bietet eine Auflösung von 1/10000 vom Nennmessweg,

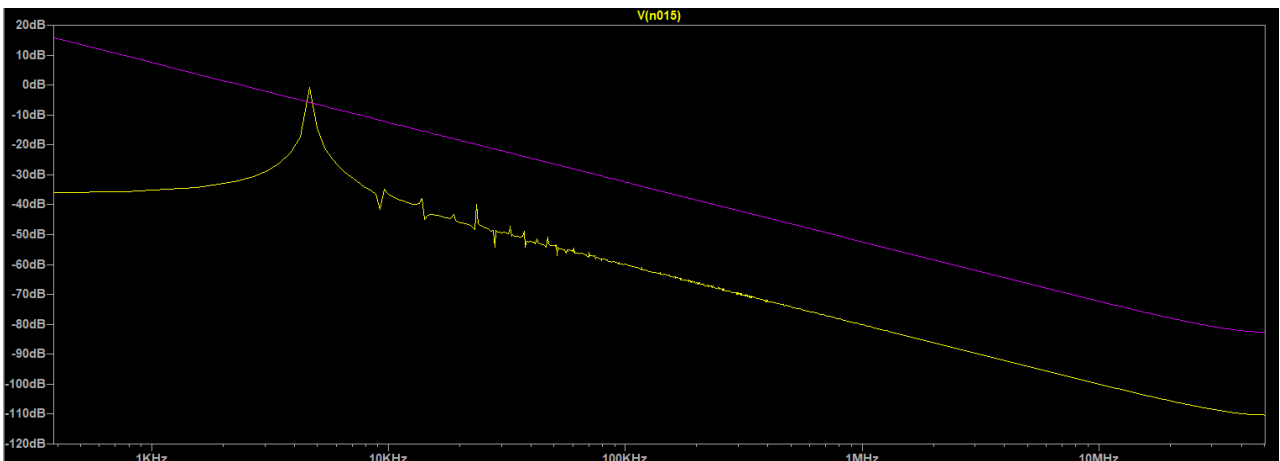
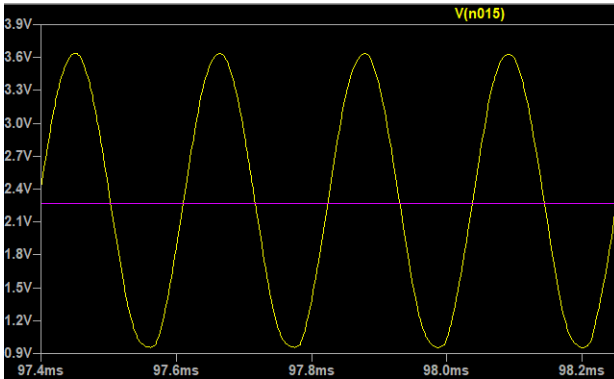


Abbildung 5: Spannungsverlauf oben; FFT unten.

was 1 μm entspricht.

Es konnte jedoch eine Nichtlinearität festgestellt werden, sodass für den Messbereich unterschiedliche Auflösungen existieren. Eine Kompensierung bzw. Reduzierung der Messgenauigkeit kann durch Hinterlegung einer Einmesskurve realisiert werden. Dadurch variiert die nichtlineare Charakteristik über den Messbereich die Messempfindlichkeit (den Anstieg der Kurve) verändert aber den nutzbaren Messbereich nicht.

3.3 Mikrocontroller

Zur Verarbeitung der Messdaten kam ein ESP32-Mikrocontroller zum Einsatz. Die beiden Sensoren bzw. deren Auswerteelektronik wurden jeweils über einen I²C-Bus mit dem Mikrocontroller verbunden. Der ESP32 wird über USB mit der notwendigen Spannung versorgt und stellt gleichzeitig die Versorgungsspannung für die angeschlossenen Messschaltungen bereit. Die Signalverarbeitung erfolgt unabhängig vom Ausgabegerät direkt auf dem Mikrocontroller mit einer festgelegten Abtastrate von 10 Hz. Dieser Wert wurde im Rahmen des vorliegenden Prüfungsaufbaus als ausreichend definiert.

3.4 Software-Mikrocontroller

Der Mikrocontroller wurde mithilfe der Programmierumgebung Arduino-IDE programmiert. Dabei handelt es sich um eine plattformübergreifende Open-Source-Entwicklungsumgebung, die insbesondere durch ihre einfache Handhabung und die breite Unterstützung durch die Community überzeugt. Ein wesentlicher Vorteil ist die Verfügbarkeit zahlreicher Bibliotheken für die Sensoransteuerung, beispielsweise für den HX711. Dadurch reduziert sich der Programmieraufwand erheblich (Arduino, 2023; SparkFun, 2023).

Die Ausgabe der Sensordaten erfolgt im CSV-Format, d. h., jede Zeile, die vom Mikrocontroller zum Computer übermittelt wird, enthält einen Zeitstempel und die entsprechenden Sensorwerte. Während des Betriebs können die Sensorwerte über das Benutzer-Frontend mithilfe eines speziellen Befehls zurückgesetzt (genullt) werden. Die Abtastfrequenz beträgt 10 Hz und wurde als ausreichend für die Anwendung des Messsystems definiert.

Die Kalibrierungsdaten der Sensoren sind im Speicher des Mikrocontrollers hinterlegt. Auf diese Weise ist auch die Implementierung nichtlinearer Kennfelder möglich. Dadurch lassen sich systematische Messfehler reduzieren. Es besteht demnach die Möglichkeit, beliebige Endgeräte mit dem Microcontroller zu verbinden, ohne dass seitens der Nutzerin bzw. des Nutzers weitere Einstellungen vorgenommen werden müssen. Über den USB-Anschluss werden sowohl die Spannungsversorgung der Sensorik als auch die serielle Datenkommunikation zwischen Mikrocontroller und Ausgabesystem realisiert.

3.5 Software-Frontend

Aufgrund des einfachen Aufbaus des Datenaustauschformats kann grundsätzlich jedes Endgerät mit USB-Schnittstelle als Frontend für das Messsystem verwendet werden. Neben klassischen Windows-PCs sind z. B. auch Geräte mit den Betriebssystemen Linux, macOS, Android oder Raspberry Pi OS geeignet. Diese Plattformunabhängigkeit erhöht die Flexibilität des Gesamtsystems erheblich.

Im Rahmen des Projekts wurde entschieden, die Frontend-Software selbst zu entwickeln, um die vollständige Kontrolle über Funktionalität und Schnittstellenverhalten zu gewährleisten. Als Entwicklungsumgebung kam Microsoft Visual Studio zum Einsatz, da es umfassende Unterstützung für C# und NET-basierte GUI-Anwendungen bietet und eine schnelle Umsetzung der Hardwarekommunikation über die SerialPort-Klasse ermöglicht.

Die erste Implementierung der Applikation erfolgte für das Windows-Betriebssystem. Besonderer Wert wurde auf eine zweckdienliche und benutzungsfreundliche Oberfläche gelegt. So wurde für jeden Messkanal sowohl eine numerische Echtzeitanzeige des aktuellen Messwerts als auch eine dynamische Echtzeitgrafik zur Visualisierung des Signalverlaufs integriert. Der Beginn und das Ende der Messung

können manuell durch Betätigung eines entsprechenden Buttons in der Software initiiert werden.

Zusätzlich wurden Start- und Endtriggerfunktionen implementiert, die eine automatisierte Durchführung von Messabläufen ermöglichen. Die Triggerfunktionen können dabei messwert- oder zeitabhängig sein. Weiterhin kann für jeden Sensor einzeln der Nullpunkt manuell gesetzt werden.

Die erfassten Daten können im CSV-Format gespeichert werden. Dadurch ist eine einfache Weiterverarbeitung in externen Analysewerkzeugen wie z. B. Microsoft Excel, MATLAB oder FlexPro möglich (MathWorks, 2023; Weisang, 2023). Die Nutzoberfläche der entwickelten Software ist in Abbildung 6 mit vier Sensorschnittstellen dargestellt.

4 Experimentelle Validierung

Im Rahmen der experimentellen Validierung des entwickelten Messsystems wurde die Messgenauigkeit der einzelnen Sensoren, sowohl des induktiven Wegsensors als auch des Kraftsensors, jeweils inklusive der entsprechenden Messverstärker und angeschlossener Auswerteelektronik/Mikrocontroller systematisch untersucht. Dabei wurden insbesondere die maximale Messabweichung (Messunsicherheit) sowie die Wiederholgenauigkeit ermittelt.

1.1 Wegsensor

Die Validierung des Wegsensors erfolgte mithilfe von Parallelendmaßen als Referenzwerte, die in Summe eine Genauigkeit von kleiner 1 μm aufwiesen. Im Rahmen der Untersuchung wurden verschiedene Messwerte im Intervall von 1 mm bis 10 mm, der maximale Messbereich des Sensors, erfasst und mit den entsprechenden Referenzwerten verglichen. Im Rahmen der Messung wurde für jeden Nennwert die Messung fünfmal wiederholt. Die gemessenen Abweichungen werden nachfolgend in Tabelle 1 dargestellt.

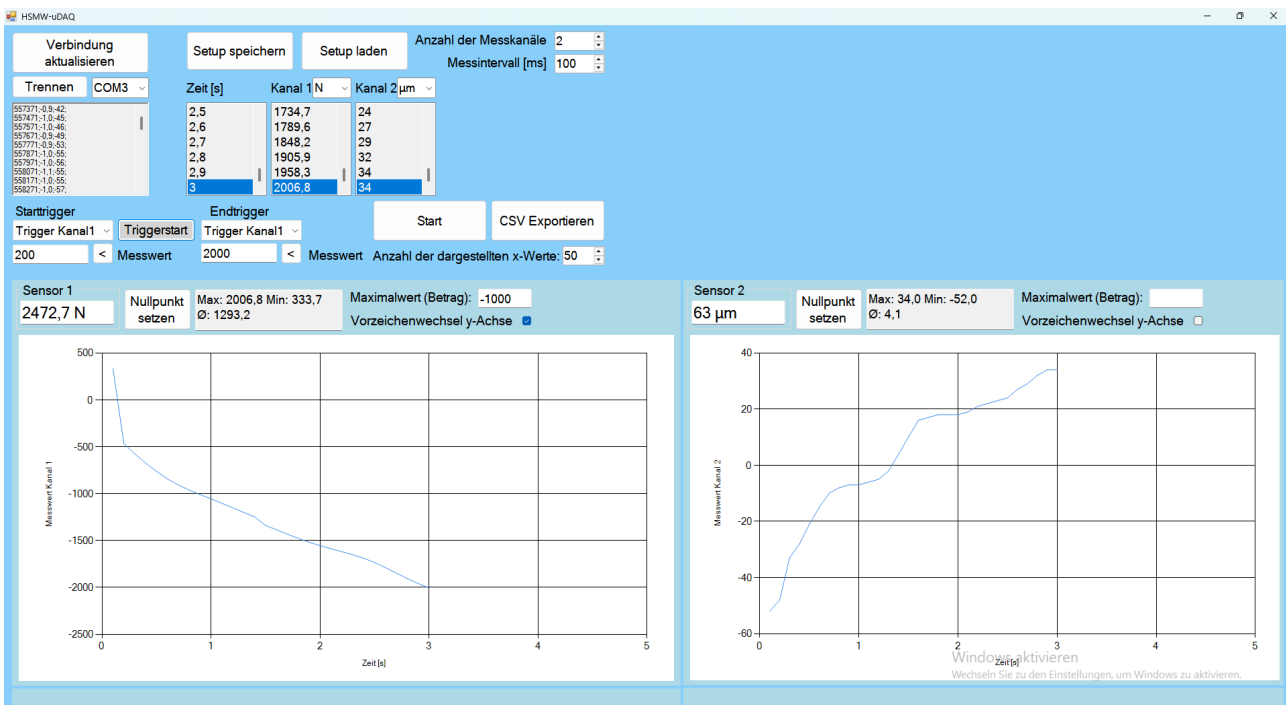


Abbildung 6: Softwareoberfläche.

Tabelle 1: Validierung des Wegsensors.

Nennwert [μm]	Maximale Differenz [μm]	Minimale Differenz [μm]
1000	-8	-30
2000	10	-13
3000	2	-10
4000	-2	-18
5000	10	-14
6000	-4	-15
7000	-13	-25
8000	-18	-38
9000	-1	-13
10000	-14	-33

Die Analyse ergab, dass für sämtliche untersuchten Nennwerte eine hohe Reproduzierbarkeit verzeichnet werden konnte. Die betragsmäßig maximale Abweichung innerhalb der untersuchten Referenzen belief sich auf 38 μm . Die Wiederholgenauigkeit der erfassten Messreihen betrug $\pm 12 \mu\text{m}$.

Gemäß den Spezifikationen des Herstellers weist der Sensor einen Linearitätsfehler von maximal 50 μm auf.

4.1 Kraftsensor

Die Validierung des Kraftsensors wurde unter Verwendung einer kalibrierten Universalprüfmaschine durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden definierte Belastungswerte aufgebracht und die Ausgangssignale des Sensors den Referenzwerten der Prüfmaschine gegenübergestellt. Zur Beurteilung der Messgenauigkeit über den gesamten Messbereich wurden neben den Hauptmesspunkten auch zusätzliche Zwischenwerte im unteren und oberen Bereich des Messbereichs erfasst. Die Überprüfung wurde mit dem Ziel durchgeführt, systematische Abweichungen zu identifizieren.

Aufgrund physikalischer Restriktionen der eingesetzten Universalprüfmaschine konnte der maximal Prüfkraftwert von 5000 Newton in diesem Versuch nicht erreicht werden. Die Resultate sind in der nachfolgenden Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Validierung des Kraftsensors.

Nennwert [N]	Betrag der Abweichung [N]	Relative Abweichung [%]
500	1,5	0,3
1000	2,9	0,3
2000	1,2	0,1
3000	23,3	0,8
4000	57,1	1,4
4500	76,2	1,7
4800	78,1	1,6

Die Auswertung der Messwerte ergab eine gute Übereinstimmung mit den Werten der Prüfmaschine. Dies lässt auf hohe Genauigkeit des entwickelten Systems schließen. Gemäß den technischen Spezifikationen der Prüfmaschine wird ein maximaler Fehler des Anzeigewerts von 1 % angegeben. Bis 3000 N ist die Abweichung kleiner 1 % und liegt somit im Fehlerbereich der Prüfmaschine. Mit zunehmender Last nimmt der Fehler jedoch kontinuierlich zu. Gemäß den Herstellerangaben wurde bei dem verwendeten Sensor ein Fehler von maximal 25 N festgestellt. Diese Ungenauigkeit beeinflusst ebenso die Messgenauigkeit des Systems.

Gemäß den vorliegenden Daten beträgt die Wiederholgenauigkeit $\pm 0,15 \%$.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In der Arbeit wird die Modernisierung eines bestehenden Prüfstands zur Wellenverformungsmessung im Maschinenbaustudium der Hochschule Mittweida untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass die mechanischen Komponenten des Prüfstands eine hohe Langlebigkeit und Funktionalität aufweisen. Demgegenüber besteht ein dringender Bedarf an der Aktualisierung der veralteten Mess- und Steuerungssoftware. Das Ziel der Modernisierung besteht in der Schaffung einer zukunftsfähigen, kosteneffizienten und anpassbaren Lösung auf Basis offener Software- und Hardwarekomponenten.

Im theoretischen Teil wird zunächst ein Überblick über den Stand der Technik gegeben. Im Rahmen dessen erfolgt eine Erläuterung der maßgeblichen Messprinzipien und Technologien. Die Messung der Kraft erfolgt mittels einer Kraftmessdose, die mit einer DMS-Vollbrücke ausgestattet ist. Zur Bestimmung der Weglänge wird ein induktiver Sensor verwendet, welcher auf dem Differenzialdrossel-Prinzip basiert. Die Erfassung und Auswertung der Signale erfolgt unter Verwendung von Auswertelektronik, die als HX711 mit einem 24-Bit-ADC-Wandler und einem Microcontroller ES32 konzipiert ist.

Die konzipierte Plattform zeichnet sich durch eine hohe Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit aus. Die technische Lösung ist dadurch gekennzeichnet, dass sie eine flexible Integration sowie eine kabellose Datenübertragung ermöglicht. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden ergänzend moderne Open-Source-Softwarelösungen präsentiert, die sich durch ihre Modularität, Anpassbarkeit und Community-Unterstützung als attraktive Alternative zu proprietären Systemen erweisen. Es sei darauf hingewiesen, dass sie unter anderem die Visualisierung und Speicherung der Messdaten in Echtzeit sowie die Integration in automatisierte Analyseprozesse gestatten.

Der praktische Teil widmet sich der Implementierung am konkreten Prüfstand. Das System beinhaltet eine Prüfvorrichtung, die mit einer hydraulischen Krafteinleitung ausgestattet ist. Darüber hinaus ist ein DMS-basierter Kraftsensor integriert, der die Kraft misst. Ein induktiver Wegaufnehmer dient der Messung der Wellendeformation an einer definierten Stelle. Die Aufbereitung der Sensorsignale erfolgt mittels einer eigens entwickelten Messschaltung, die zudem eine Digitalisierung der Signale beinhaltet. Eine eigens entwickelte Oszillatorschaltung gewährleistet die Bereitstellung der erforderlichen Wechselspan-

nung für den induktiven Wegsensor. Die Erfassung, Verarbeitung und Übermittlung der Daten erfolgt durch den ESP32 an die neuentwickelte Auswertesoftware.

Die vorliegende Arbeit demonstriert, dass durch den gezielten Einsatz von Open-Source-Technologien und Embedded-Systemen eine nachhaltige und zukunftssichere Modernisierung klassischer Lehrprüfstände realisierbar ist. Das entwickelte Messsystem hat das Potential an vielen Prüfständen eingesetzt zu werden. Dabei können auch andere Sensortypen in das System integriert werden. Je nach den Genauigkeitsanforderungen können auch fertige Verstärkerboards oder Sensoren mit integrierter Verstärkung implementiert werden. Die Software kann auch auf andere Betriebssysteme, wie z. B. Linux oder Android adaptiert werden. Aufgrund der kompakten Abmessungen des Systems ist auch eine Anwendung im Bereich des Condition Monitoring denkbar.

Literaturverzeichnis

- Alfaris, M., Abdullah, S., & Al-Ghamdi, S. (2020). ESP32-based smart home automation system. In 2020 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICET) (S. 1–5). <https://doi.org/10.1109/ICET48711.2020.9143084>
- Arduino. (2023). Arduino IDE user guide. <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2> (abgerufen am 31. 07.2025)
- Avia Semiconductor. (2014). HX711 24-bit analog-to-digital converter for weigh scales [Datenblatt]. https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf (abgerufen am 31. 07.2025)
- Czechowicz, A. (2014). Aktoren und Sensoren für mechatronische Systeme (2. Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-3761-1>
- Espressif Systems. (2023). ESP32 technical reference manual (Version 4.4). https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (abgerufen am 31. 07.2025)
- Fraden, J. (2010). Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications (4th ed.). Springer.
- HBM. (2021.). B00545 – Technical guide for the use of universal testing machines [PDF]. <https://www.hbm.com/fileadmin/media-pool/hbmdoc/technical/B00545.pdf> (abgerufen am 31. 07.2025)
- HIS-HE. (2008). Lebenszyklusmanagement/PPP an Hochschulen (Forum Hochschulentwicklung, Bd. 12). https://www.his-he.de/wp-content/uploads/fileadmin/user_upload/Publikationen/Forum_Hochschulentwicklung/fh-200812.pdf (abgerufen am 31. 07.2025)
- Jung, M., Kim, D., Lee, H., & Lee, S. (2019). Flexible and printed strain sensors for structural health monitoring: From materials to integrated systems. *Advanced Functional Materials*, 29(17), 1808314. <https://doi.org/10.1002/adfm.201808314>
- Keil, S. (2017). Dehnungsmessstreifen (2. Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-13612-3>
- Kumar, R., Singh, A., & Sharma, N. (2021). Design and implementation of wireless weight measurement system using HX711 and ESP32. In 2021 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT) (S. 123–127). <https://doi.org/10.1109/ICSSIT51724.2021.9529233>
- Kuttner, T., & Rohnen, A. (2019). Praxis der Schwingungsmessung: Messtechnik und Schwingungsanalyse mit MATLAB® (2. Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25048-5>
- Messotron. (2022, 21. April). Unterschiede im Aufbau von LVDT und LVIT. Abgerufen am 27. Juni 2025, <https://www.messotron.de/blog/unterschiede-lvdt-lvit> (abgerufen am 31. 07.2025)
- National Instruments. (2020). Understanding signal conditioning for bridge-based sensors. Abgerufen am 27. Juni 2025 <https://www.ni.com/de-de/support/documentation/supplemental/06/understanding-signal-conditioning.html> (abgerufen am 31. 07.2025)
- OpenDAQ. (2023). OpenDAQ: Modular data acquisition platform. <https://opendaq.org> (abgerufen am 31. 07.2025)
- Open Ephys. (2024). Open Ephys platform for neurophysiology. <https://open-ephys.org> (abgerufen am 31. 07.2025)
- PyMeasure. (2023). PyMeasure: Scientific measurement framework in Python. <https://pymasure.readthedocs.io> (abgerufen am 31. 07.2025)
- QtiPlot. (2023). QtiPlot: Scientific data analysis and visualization. <https://www.qtiplot.com> (abgerufen am 31. 07.2025)
- Rajasekaran, A. V., Prakash, S., & Kumar, P. (2021). An energy-efficient wireless sensor node using ESP32 for IoT applications. In 2021 International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE) (S. 59–63). <https://doi.org/10.1109/ICACCE52009.2021.9443134>
- Rein, S. (2008). Lebenszyklusorientiertes Management öffentlicher Liegenschaften: Abschlussbericht. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.
- Rothbucher, R. (2017). Technische Mechanik: Experimentalmethoden für Ingenieure. Springer Vieweg.
- Santos, R., & Santos, S. (2020). Internet of Things with ESP32. Packt Publishing.
- Sigrok Project. (2024). Sigrok: Open source signal analysis software. <https://sigrok.org> (abgerufen am 31. 07.2025)
- Singh, P. (2019). Load cell signal conditioning and

weight measurement using HX711. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 8(10), 4193–4198.
<https://doi.org/10.15662/IJAREEIE.2019.0810054>

SparkFun. (2023). HX711 Load Cell Amplifier hookup guide. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/hx711-load-cell-amplifier-hookup-guide> (abgerufen am 31. 07.2025)

Wheatstone, C. (1843). An account of several new instruments and processes for determining the constants of a voltaic circuit. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 133, 303–327.
<https://doi.org/10.1098/rstl.1843.0010>

The Relevance of Cultural Intelligence in Our Modern World: Implications for Intercultural Education

A Comprehensive Literature Review

Jill Deschner-Warner

Contact: Jill Deschner-Warner, Hochschule Mittweida, deschner@hs-mittweida.de

Abstract

In increasingly diverse classrooms shaped by migration and cultural complexity, Cultural Intelligence (CQ) has emerged as a vital competency for educators and learners. This paper examines CQ as both an individual capability and a pedagogical and institutional resource within intercultural education, drawing on Ang and Van Dyne's four-dimensional model, Deardorff's Process Model of Intercultural Competence, and Banks' theory of multicultural education. Through case studies—including pre-service teacher training in Turkey, multilingual pedagogies in the Netherlands, curriculum integration in Singapore, bicultural frameworks in New Zealand, and virtual collaboration via COIL initiatives—the study illustrates how CQ supports teacher development, student engagement, and inclusive pedagogy. It also addresses challenges such as the individualization of intercultural work, measurement limitations, and the gap between personal competencies and systemic change. Policy debates in Germany regarding migrant-background student ratios underscore the need to embed CQ across educational systems, ensuring inclusion and responsiveness at both classroom and institutional levels.

Keywords: Cultural Intelligence, CQ, Intercultural Education, Culturally Inclusive Instruction, Educational Policy.

1 Introduction

In 2025, students with migrant backgrounds made up more than 40% of the pupil population in many urban German schools, re igniting public debate about how educational institutions respond to cultural and linguistic diversity (Baas, 2025). As these demographic changes reshape classrooms, educators and policymakers are confronted with an urgent question: How can schools create learning environments that are not only diverse, but genuinely inclusive and responsive?

One proposed approach draws on the concept of Cultural Intelligence (CQ) a multidimensional capacity that supports individuals in navigating cultural differences effectively (Ang & Van Dyne, 2008). Originally developed in organizational psychology, CQ is now gaining traction in educational contexts where cultural interaction is both common and consequential. It encompasses four interconnected dimensions: metacognitive (awareness of cultural assumptions), cognitive (knowledge of cultural systems), motivational (the desire to engage across cultures), and behavioral (flexibility in interaction) (Earley & Ang, 2003; Ang & Van Dyne, 2008).

Parallel to this, the field of intercultural education has

long emphasized critical engagement with identity, power, and representation, alongside calls for culturally responsive pedagogy and structural inclusion (Banks, 2015; Deardorff, 2006). Yet in many systems, these ideals remain difficult to implement. Tokenistic diversity events, minimal teacher preparation, and reactive policy shifts often leave deeper inequities unaddressed (Schultz, Jones Walker, & Chikatur, 2008).

This paper examines Cultural Intelligence as both a practical framework and a theoretical lens for advancing intercultural education. It argues that CQ offers a structured, research-informed way for educators to cultivate the awareness, knowledge, and adaptability needed in diverse classrooms. Drawing on key theoretical models and recent empirical studies, the paper explores how CQ can support teacher development, student engagement, and policy innovation. It also critically engages with limitations of the concept, including concerns about its individualist orientation, measurement validity, and potential detachment from systemic reform.

By anchoring the discussion in current debates—such as Germany's ongoing conversations about classroom diversity ratios—this paper positions Cultural Intelligence not just as a helpful tool, but as a necessary component in building equitable and culturally responsive education systems.

2 Theoretical Foundations

Understanding the role of Cultural Intelligence (CQ) in today's educational settings requires grounding it within both psychological theory and intercultural pedagogy. Originally introduced by Earley and Ang (2003), CQ was conceptualized as a unique form of intelligence that enables individuals to navigate effectively across diverse cultural contexts. Ang and Van Dyne (2008) later refined this concept into four interconnected dimensions—metacognitive, cognitive, motivational, and behavioral—that together shape how people interpret and respond to cultural differences.

METACOGNITIVE CQ refers to the capacity for cultural awareness and reflection. In classrooms, this means teachers critically examining their own cultural assumptions and adapting their teaching practices accordingly (Van Dyne et al., 2012).

COGNITIVE CQ involves knowledge of cultural norms, values, and practices. This knowledge helps educators understand students' diverse learning styles, communication preferences, and expectations (Thomas et al., 2008).

MOTIVATIONAL CQ captures the interest, confidence, and persistence to engage with cultural differences. Teach-

ers with high motivational CQ are more likely to show empathy and sustain cross-cultural interactions (Templer et al., 2006).

BEHAVIORAL CQ reflects the ability to adapt verbal and non-verbal behaviors appropriately in diverse cultural settings—crucial for modeling inclusive classroom interactions.

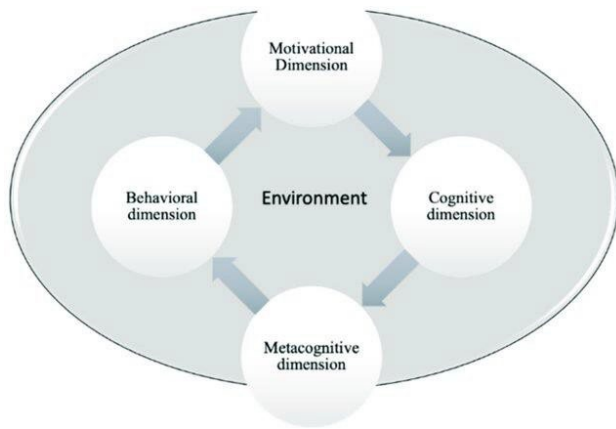


Figure 1: illustrates Ang and Van Dyne's four-dimensional CQ mod.

These dimensions resonate strongly within intercultural education, which seeks to foster equity, inclusion, and mutual respect in diverse classrooms. While the CQ model categorizes metacognitive, cognitive, motivational, and behavioral dimensions separately for analytical clarity, in practice, they are deeply intertwined and interdependent. For example, a teacher's ability to adapt behavior (behavioral CQ) is shaped by both their cultural understanding (cognitive CQ) and their willingness to engage across difference (motivational CQ), while metacognitive CQ enables the ongoing reflection needed to connect and refine all three. Deardorff's (2006) Process Model of Intercultural Competence complements this perspective by showing how intercultural attitudes—such as openness and curiosity—serve as the foundation for acquiring knowledge and skills, which in turn lead to internal outcomes like empathy and adaptability, and external outcomes such as effective and respectful communication. Both frameworks emphasize that intercultural competence is not linear or static, but dynamic and recursive, developing through continuous reflection, action, and lived experience. As Byram (1997) reminds us, intercultural competence “is not a fixed set of knowledge but a process of learning and reflection.”

Further connecting theory to practice, Banks's (2015) multicultural education framework outlines five dimensions: content integration, knowledge construction, prejudice reduction, equity pedagogy, and empowering school culture. CQ can serve as a practical toolkit through which educators embody these dimensions—particularly by adapting curricula and teaching approaches to meet diverse learners' needs.

Mezirow's (1991) Transformative Learning Theory also aligns with CQ, especially its metacognitive aspect. Mezirow argues that learners transform their perspectives through critical reflection on assumptions and worldviews.

Educators equipped with CQ are well-positioned to foster environments that encourage this kind of intercultural dialogue and reflexivity.

Though CQ originated in organizational psychology, it has proven relevant across sectors, including education. For example, Leung, Ang, and Tan (2014) found CQ predicted success in international collaborations better than emotional intelligence or general cognitive ability. Within education, recent studies reinforce CQ's value: Karadag (2024) reported that pre-service teachers with higher CQ experience greater confidence managing multicultural classrooms and communicating across cultures. Similarly, Hu and Leung (2023) linked CQ to heightened intercultural sensitivity in teachers and increased engagement among students.

Together, these perspectives frame CQ as both a practical guide and reflective lens. It equips educators not only to interact across cultures but to do so thoughtfully, ethically, and flexibly. When integrated with intercultural education's goals, CQ helps bridge the gap between diversity as demographic fact and inclusion as meaningful classroom practice.

3 Relevance in Modern Global Context

The need for Cultural Intelligence (CQ) in education has become increasingly urgent in recent years, driven by rapid demographic shifts, heightened migration flows, and growing cultural pluralism that have transformed classrooms into microcosms of global complexity (Banks, 2015; Deardorff, 2006; Nieto, 2010). Education systems today face more than just diversity as a demographic fact—they are challenged to address deeper issues of equity, identity, and belonging. CQ offers educators essential tools to navigate this cultural complexity and foster genuinely inclusive learning environments.

A striking illustration comes from Germany in 2025, where policymakers have debated imposing caps on the number of migrant-background students in urban schools, citing concerns about integration and language support. Though well-intentioned, critics warn these measures risk promoting exclusion and segregation rather than true inclusion (The Times, 2025). Similar tensions play out across Europe. For instance, France, with over 400,000 international students as part of its “Choose France” initiative in 2024, continues to grapple with debates around assimilation and language policy, highlighting the delicate balance between openness and cultural cohesion (Le Monde, 2024). Likewise, the Netherlands and Belgium's Flemish region face ongoing negotiations around multicultural policies, oscillating between inclusive approaches and retrenchment amid political and social pressures (Vandenbroucke et al., 2022).

Within this challenging policy landscape, CQ serves as a valuable counterbalance to reactive or divisive responses to cultural diversity. Educators and leaders who possess Cultural Intelligence are better equipped to interpret subtle cultural dynamics, challenge deficit-oriented assumptions, and cultivate learning environments that affirm and empower all students (Ang & Van Dyne, 2008; Deardorff, 2006).

Recent research further underscores CQ's critical rele-

vance. The 2023 EU Eurydice report, which examined 39 education systems, highlights the vital role of teacher training focused on diversity and inclusion in securing equitable outcomes for migrant and minority students (European Commission, 2023). In the Netherlands, studies on multilingual Content and Language Integrated Learning (CLIL) schools show that intentional attention to linguistic diversity supports both inclusion and academic achievement (Pérez Cañado et al., 2025). Moreover, the OECD’s 2024 International Migration Outlook notes a shift in many countries toward civic integration frameworks centered on local intercultural engagement—precisely the domain where CQ’s motivational and behavioral dimensions prove most relevant (OECD, 2024).

Together, these policy debates and research findings make it clear that Cultural Intelligence is not a mere optional skill but a fundamental competency for contemporary education. In systems grappling with demographic change and politically charged narratives, CQ equips educators with reflective awareness, cultural knowledge, empathy, and adaptability—the essential tools to transform diversity from a source of division into a pedagogical asset. Building on the recognition of Cultural Intelligence as a vital competency in addressing today’s educational challenges, it is important to explore how CQ translates into concrete practice. The next section takes a deeper look into the ways educators and schools are actively integrating CQ principles to create inclusive, responsive, and adaptable learning environments that meet the needs of diverse student populations.

4 CQ in Educational Practice: A Micro Perspective

While macro-level education policies often set the framework for inclusion and integration, it is within the daily realities of classroom practice and teacher development that Cultural Intelligence (CQ) finds its most immediate and practical application. Ang and Van Dyne’s (2008) four-dimensional CQ model offers educators a useful framework to cultivate metacognitive reflection, intercultural knowledge, motivation, and adaptive behaviors that enhance engagement with cultural diversity. This section explores how these dimensions are operationalized in various educational contexts, demonstrating CQ’s transformative potential in multicultural learning environments.

4.1 Turkey: CQ and Teacher Self-Efficacy in Diverse Classrooms

A 2024 study by Karadag involving over 600 pre-service teachers in Turkey revealed a strong positive correlation between high CQ levels and increased self-efficacy in managing diverse classrooms. Teachers with elevated CQ scores reported greater confidence in differentiating instruction, engaging culturally diverse learners, and effectively addressing intercultural conflict. These results align with Deardorff’s (2006) Process Model of Intercultural Competence, which emphasizes attitudes like openness and cultural humility as essential foundations for effective intercultural behavior.

4.2 The Netherlands: Inclusion Through Multilingual and Culturally Responsive Pedagogies

In the Netherlands, where linguistic and cultural diversity have surged in urban schools, recent research highlights CQ’s role in fostering inclusive, multilingual learning environments. Pérez Cañado et al. (2025) studied bilingual schools employing Content and Language Integrated Learning (CLIL) frameworks, finding that teachers trained in intercultural approaches grounded in CQ principles reported higher student engagement and better academic outcomes—especially for students with migrant backgrounds. These findings resonate with Banks’ (2015) call for “equity pedagogy” and culturally responsive teaching as essential elements of multicultural education.

4.3 Singapore: Systemic Integration of CQ into Education Policy

Singapore offers a notable example of CQ embedded at the national policy level. Since 2018, its Ministry of Education has integrated intercultural competence and “global awareness” into teacher education programs. Schools implement cross-cultural simulations, structured reflection activities, and multilingual programming—practices that explicitly nurture metacognitive and behavioral CQ (Lim & Tan, 2023). These initiatives not only promote inclusivity in classrooms but also prepare students to succeed in an interconnected global workforce, aligning with the OECD’s (2024) emphasis on global competence as a core 21st-century skill.

4.4 Germany: Institutional Efforts Toward Intercultural Competence in Teacher Education

From research into the structure of teacher preparation in Germany, it is evident that while Cultural Intelligence is not uniformly embedded as a mandatory component across all teaching disciplines, there are notable efforts within certain institutions to integrate intercultural competence training—particularly within language teacher education. For example, TU Berlin mandates a module on intercultural communication and regional studies for future language teachers (Freie Universität Berlin, 2025), aligning closely with the metacognitive and behavioral dimensions of CQ (Ang & Van D, 2008) (Freie Universität; Mezirow, 1991; Nieto, 2010; OECD, 2024; O’Dowd, 2023; Pérez

Cañado, 2025; Qin, 2024; Schultz, 2008; Baas, 2025; Tali-dong, 2022). Additionally, several universities—including Hamburg, Potsdam, and Dresden—have implemented seminars, project-based learning, and elective programs aimed at developing intercultural awareness and reflective practices among pre-service teachers (Universität Hamburg, 2025.; Universität Potsdam, 2025.; Technische Universität Dresden, 2025.). These initiatives reflect a growing recognition of the importance of CQ at the micro level of teacher preparation, though the integration remains inconsistent and often dependent on subject area or institutional initiatives rather than national policy mandates.

4.5 New Zealand: Bicultural Framing and Cultural Responsiveness

New Zealand's education system exemplifies indigenous-informed CQ development. Grounded in its bicultural foundation through the Treaty of Waitangi, many schools incorporate Māori concepts such as *whanaungatanga* (relationship-building) and *manaakitanga* (care and respect) into their pedagogy. Teacher education programs include structured learning around cultural identity, power, and privilege, drawing on Deardorff's intercultural competence model and Mezirow's (1991) transformative learning theory. In this context, CQ is more than a skill set; it is a commitment to relational and ethical educational practice.

5 Virtual Exchange: Digital Intercultural Collaboration as CQ Development

Virtual exchange programs, particularly Collaborative Online International Learning (COIL), have emerged as powerful tools for fostering CQ, especially among students and educators who face barriers to physical mobility. COIL connects classrooms across countries through digitally facilitated collaboration, enabling authentic intercultural learning experiences in real time (O'Dowd, 2023). Research consistently shows COIL cultivates all four CQ dimensions, with particular strength in metacognitive and motivational CQ. As O'Dowd (2023) explains, "Virtual exchange environments compel students to reflect on their assumptions and perspectives, leading to deep, intercultural learning outcomes that often surpass traditional classroom instruction." This reinforces Deardorff's (2006) model, where self-awareness and adaptability are central to development.

A recent multi-institutional study found that students participating in COIL projects reported increased intercultural empathy, curiosity, communication adaptability, and confidence in global collaboration (Hackett, Janssen, Beach, Perreault, Beelen, & Van Tartwijk (2023). Instructors observed that COIL's structure encouraged "slower, more intentional engagement" with cultural differences, fostering a reflective learning environment (O'Dowd, 2023, p. 84). Beyond cognitive benefits, COIL also promotes equitable access to intercultural learning. Hackett, Janssen, Beach, Perreault, Beelen & Van Tartwijk (2023) note, "Virtual exchange democratizes international learning, making it accessible to students from diverse geographic and socioeconomic backgrounds who might not otherwise participate in study abroad." Programs such as Erasmus+ Virtual Exchange, State University of New York (SUNY) COIL, and the Global Classrooms Project exemplify how institutions are embedding CQ development in digital pedagogy—not only as a response to pandemic realities but as a long-term educational strategy.

Together, these global case studies affirm that Cultural Intelligence transcends theory to become a practical, learnable capability that strengthens inclusive educational practice. CQ enhances teacher self-efficacy, nurtures student belonging, and supports equity-driven systems—goals central to Deardorff's model and Banks' equity ped-

agogy. Whether through training programs, curriculum design, or everyday classroom interactions, CQ functions as a vital bridge between intercultural theory and effective pedagogy.

6 Conclusion

As CQ expert Trisha Carter (2025) puts it, "Cultural intelligence is most needed when it's hardest to access." In times of global instability, whether economic, political, or social—being able to understand different perspectives and respond flexibly isn't just valuable, it's essential. CQ provides a framework for this, helping individuals and institutions bridge divides and find solutions even when the problems seem overwhelming (Carter, 2025).

That said, challenges remain. CQ isn't yet a consistent part of teacher education and is often dismissed as a "soft skill" rather than a critical teaching tool. Research shows that rigid curricula and limited training leave many educators unprepared to bring intercultural competencies into their classrooms (HBond, 2024). For example, a recent study from China found that even when teachers practiced intercultural reflection through lesson study methods, the lack of coordinated, systemic training limited the overall impact (Qin, 2024). Higher education scholars also stress the need to prioritize skills like empathy, communication, and cultural responsiveness early in teacher preparation, yet these often get sidelined for more measurable content (PMC, 2022).

To avoid reactive policies and exclusion in schools, CQ must be treated with the same seriousness as core skills like literacy or STEM. That means integrating intercultural learning across curricula, investing in ongoing teacher development, and embedding CQ into education policies—not just as an individual skill but as a shared value across the system.

It is important to consider that the real power of Cultural Intelligence lies in its invitation to humility. CQ asks educators, researchers, and policymakers not to have all the answers, but to remain curious, self-aware, and willing to adapt. In doing so, CQ becomes not just a skillset but a mindset—one profoundly needed in our modern world. Fostering such intelligence within classrooms and institutions positions us to build not only culturally responsive schools but also more cohesive and compassionate societies.

References

- Ang, S., & V. (2008). Conceptualization of cultural intelligence: Definition, distinctiveness, nomological network (Bd. Handbook of cultural intelligence). Routledge.
- Banks, J. (2015). Cultural diversity and education: Foundations, curriculum, and teaching. (Routledge., Hrsg.) (6th ed.).
- Baas, M. (2025). Bildungsbeteiligung nach Migrationshintergrund: Der Einfluss von Zuwanderungsgeneration, Zuzugsalter und Zuzugsmotiven. German Fed-

- eral Statistical Office. <https://www.destatis.de/DE/Methoden/WISTA-Wirtschaft-und-Statistik/2021/02/bildungsbeteiligung-022021.pdf>
- Byram, M. (1997). Teaching and Assessing Intercultural Communicative Competence. *Multilingual Matters*.
- Carter, T. (2025, May 20). When cultural intelligence matters most: Strengthening CQ strategy in a world of uncertainty. Von <https://davidlivermore.com/2025/05/20/when-cultural-intelligence-matters-most-strengthening-cq-strategy-in-a-world-of-uncertainty>
- Deardorff, D. K. (2006). Identification and assessment of intercultural competence as a student outcome of internationalization. (*Journal of Studies in International Education*, Aug.). <https://doi.org/10.1177/1028315306287002>
- Dresden, T. U. (2025, 20 May). Zentrum für Lehrerbildung, Schul- und Berufsbildungsforschung. <https://tu-dresden.de/zlsb/forschung-und-projekte/impress/lehrveranstaltungen-vo>
- Earley, P. C. (2003). *Cultural intelligence: Individual interactions across cultures*. Stanford University Press.
- European, C. (2023 October 9). EU-wide report investigates national methods to counter discrimination in schools. Eurydice Network.
- Freie Universität, B. (2025, March 25). Modulbeschreibung: Interkulturelle Kommunikation und Landeskunde. Von <https://www.tu.berlin/en/daf/studying-teaching/guidelines-and-forms/module-descriptions>
- Hackett, S., Janssen, J., Beach, P., Perreault, M., Beelen, J., & Van Tartwijk, J. (2023). The effectiveness of Collaborative Online International Learning (COIL) on intercultural competence development in higher education. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20, 5. <https://doi.org/10.1186/s41239-022-00373-3>
- Hamburg, U. (2025, June 19). DiCoT – Diversity and Cultural Transformation. Von <https://www.ew.uni-hamburg.de/en/internationales/projekte/dicot.html>
- HBond. (2024, April 17). Bridging the gap: The neglect of soft skills in undergraduate education and the role of ELA and HEALS. <https://hbond.org/bridging-the-gap-the-neglect-of-soft-skills-in-k-12-and-undergraduate-education/>
- Hofmann, M. (2025, July 8). Germany's Education Minister suggests classroom cap on immigrant pupils. *The National News*. <https://www.thenational-news.com/news/europe/2025/07/08/germanys-education-minister-suggests-classroom-cap-abgerufen>
- Hu, Y. &. (2023). The influence of cultural intelligence on teaching effectiveness and student engagement in multicultural classrooms. *Journal of International and Intercultural Communication*, 16(2), 175–195. <https://doi.org/10.1080/17513057.202>
- Karadag, E. (2024). Cultural intelligence and multicultural attitudes in teacher education: Impacts on teacher self-efficacy. *International Journal of Educational Research*, 125, 102–198. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2024.102198>
- Le, M. (2024, March 16). For French universities, international students are a form of political, scientific and economic soft power.
- Leung, K. A. (2014). Intercultural competence: A key factor in international collaborations. *Journal of Applied Psychology*, 99(6), 1221–1235. <https://doi.org/10.1037/a0036480>
- Lim, A. &. (2023). Cultivating cultural intelligence through teacher education in Singapore: Policy and practice. *Asia Pacific Journal of Education*, 43(1), 34–52. <https://doi.org/10.1080/02188791.2022.2113457>
- Mezirow, J. (1991). *Transformative dimensions of adult learning*.
- Nieto, S. (2010). *The light in their eyes: Creating multicultural learning communities* (10th anniversary ed.). Teachers College Press.
- O'Dowd, R. (2023). Virtual exchange and the development of intercultural communicative competence and CQ. *Language Learning & Technology*.
- OECD. (2024). *International Migration Outlook 2024: Recent developments in migrant integration policy*. OECD Publishing.
- Pérez Cañado, M. L. (2025). Inclusion in culturally and linguistically diverse bilingual schools in the Netherlands: Promising beginnings, ongoing challenges. *Learning Environments Research*.
- Potsdam, U. (2025, June 16). DAAD-Projekt: Interkulturelle Kompetenzen in der Lehrerbildung. Zentrum für Lehrerbildung und Bildungsforschung (ZeLB). Von <https://www.uni-potsdam.de/en/zellb/education-research/daad-projekt/interkul>
- Qin, X. (2024). Collaborative inquiry in action: A case study of lesson study for intercultural education. *Asian Pacific Journal of Second and Foreign Language Education*, 9(Article 66). <https://doi.org/10.1186/s40862-024-00294-w>
- Schultz, K. J. (2008). Challenging beliefs about cultural diversity in education: A synthesis and critical review of trainings with pre-service teachers. *Teacher Education Quarterly*, 35(2), 25–44. <https://doi.org/10.3102/0034654314558492>
- Talidong, K. J. (2022). High education and university teaching and learning processes: Soft skills. *Journal of Education and Educational Development*, 9(2), 68–75. Von <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9518473>
- Templer, K. J. (2006). Motivational cultural intelligence, realistic job previews, and adjustment of self-initi-

ated expatriates. *Management Research Journal*, 5(2), 150–171.

Thomas, D. C. (2008). Cultural intelligence: Domain and assessment. *International Journal of Cross Cultural Management*.
<https://doi.org/10.1177/1470595808091787>

Times, T. (2025, January 15). German minister stokes debate over migrant pupil cap. Von
<https://www.thetimes.co.uk/article/german-minister-stokes-debate-over-migrant-pupil-cap-s23q8wqvp>

Van Dyne, L. A. (2012). Development and validation of the CQS: The Cultural Intelligence Scale. In *Handbook of cultural intelligence* (S. pp. 16–38).

Vandenbroucke, F. V. (2022). Mainstreaming or retrenchment?

Migration-related diversity in Dutch and Flemish education policies. *Comparative Migration Studies*.

Objektive Bildqualitätsmessung in der Digitalforensik

MTF-basierte Quantifizierung der Bildqualität und erzielbarer Messgenauigkeit für forensische Bildanalysen

Marie Luise Heuschkel, Felix Fischer, Dirk Labudde

Kontakt: Marie Luise Heuschkel, Hochschule Mittweida, marie.heuschkel@hs-mittweida.de

Zusammenfassung

Bildgestützte digitalforensische Methoden wie der digital-anthropometrische Rigabgleich als forensisches biometrisches Verfahren erfordern die präzise und genaue Lokalisierung von Gelenkpunkten einer Zielperson in Überwachungsaufnahmen. Diese ist maßgeblich von der Bildqualität abhängig, deren Bewertung bislang durch subjektive Einschätzungen erfolgt. Quantitative, objektivierbare Kriterien für die forensische Verwertbarkeit von Bildmaterial fehlen dagegen. Diese Studie beschreibt einen systematischen Ansatz zur quantitativen Bildqualitätsbewertung mittels Modulation Transfer Functions (MTF), der die Kontrastübertragungsfähigkeit optischer Systeme in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz misst. Anhand eines Experiments mit einer *Sigma fp* Kamera und *65mm f/2* Objektiv wurde die theoretische mit der praktischen Messgenauigkeit verglichen. MTF-Messungen bestimmten das Auflösungsvermögen bei verschiedenen Blendenstufen, wobei *f/2.8* die höchste Abbildungsleistung zeigte. Die gradientenbasierte Kantenlokalisierung mittels Sobel-Operator ermöglichte eine präzise Punktbestimmung. Bei 108,6m Entfernung wurde eine zentimetergenaue Messung erreicht, während bei *f/22* durch Beugungsunschärfe messbare Abweichungen auftraten. Das Verfahren quantifiziert fallspezifisch die benötigte Bildqualität und die erreichbare Messgenauigkeit in Abhängigkeit von Objektgröße, Kameradistanz und Aufnahmebedingungen. Es ersetzt subjektive Bewertungen durch objektive, nachvollziehbare Kriterien und stärkt damit die Gerichtsverwertbarkeit forensischer Bildanalysen. Die Methode erfordert zwar fallspezifische Messungen, bietet aber erstmals einen standardisierten Ablauf zur quantitativen Bildqualitätsbewertung in der forensischen Praxis.

Keywords: 2D metrology, forensic application, image quality, measurement accuracy, quantitative quality criteria, digital anthropometric pattern matching.

1 Einführung

Bildmaterial spielt in der Forensik eine wichtige Rolle - sowohl als Dokumentationsmittel als auch zunehmend zur Beweiserhebung. Mit der allgegenwärtigen Generierung von Bildern und Videomaterial sowie von Videoüberwachung als fester Bestandteil von Sicherheitsmaßnahmen (Imoto et al., 2025) nimmt die Bedeutung der Beweiserhebung aus digitalem 2D-Material immer kontinuierlich zu. Die Beweiskraft ist jedoch nicht automatisch gegeben: Jede Aufnahme erfasst nur einen Ausschnitt der Wirklichkeit, wobei zwangsläufig Informationen verloren gehen - allen voran die Tiefeninformation, aber auch kontextuelle

Aspekte. Solche Fälle kann der digital-anthropometrische Rigabgleich (Heuschkel & Labudde, 2024) abdecken, der sich ein passives biometrisches Merkmal in Form eines Körpermusters zunutze macht, welches als Rig, ein digitales, abstrahiertes, skelettartiges Körpermodell, extrahiert wird und aus Längen-, Breiten- und Höhenmaßen besteht, die den Bewegungsapparat des Menschen repräsentieren. Bei diesem biometrischen Verfahren, das dem Beitrag als anlassgebender Anwendungsfall dient, wird eine Testperson photogrammetrisch erfasst und mittels Gelenkpunkten ihr Körpermuster als 3D-Rig abgeleitet. Durch die Superimposition des rekonstruierten 3D-Modells einschließlich der virtuell parametrisierten Überwachungskamera mit dem Überwachungsmaterial und dem 3D-Rig der Testperson wird der Abgleich zwischen den Rigs der Test- und Zielperson ermöglicht (Engelhard et al., 2024; Heuschkel & Labudde, 2024). Eine Lokalisierung der Gelenkpunkte muss folglich präzise möglich sein. Diese Möglichkeit steht und fällt mit dem Hell-Dunkel-Kontrast im Bild, unabhängig von der verwendeten Methodik - sei es visuell-kognitiv durch einen menschlichen Operator, durch Computer Vision oder durch Deep Learning-Algorithmen wie Human Pose Estimation. Der Hell-Dunkel-Kontrast beschreibt, wie stark Helligkeitsunterschiede im Bild differenzierbar sind. Neben dem inhärenten Informationsverlust durch die Projektion in die 2D-Ebene spielt somit die durch eine Vielzahl von Faktoren bestimmte Bildqualität für die weitere Informationsübertragung eine entscheidende Rolle. Hinzu kommt die zumeist geringe Qualität von Aufnahmen von Überwachungskameras, bspw. aufgrund geringer Auflösung, stark verzerrender Perspektive oder ungünstiger Aufnahmebedingungen, was unter anderem ökonomischen Kompromissen geschuldet ist (Gibelli et al., 2016). Diese Limitierungen erfordern eine Bewertung der Bildqualität bei der Auswahl geeigneter Frames für die Begutachtung. In der Fachliteratur wird im Zusammenhang mit Fallstudien, Prozessketten, Evaluierungen und standardisierten Vorgehensweisen (SOPs) durchgehend betont, dass eine ausreichende Bildqualität sichergestellt werden muss (z.B. Compton et al., 2001). Die Spezifikationen bleiben jedoch vage: Zwar wird die Notwendigkeit ausreichend hoher Bildqualität festgestellt (z.B. Russo et al., 2017; Nielsen et al., 2019; Criminisi et al., 1999; Cattaneo & Gibelli, 2022). Doch objektivierbare, quantitative Kriterien fehlen und unklar bleibt, wie hoch die Bildqualität in Abhängigkeit von der erforderlichen Messgenauigkeit sein muss, welche Toleranzen zulässig sind und ob diese Anforderungen im konkreten Fall erfüllt sind. Die Bewertung bleibt daher der subjektiven Einschätzung des Operators überlassen. In den wenigen Fällen, in denen quantitative Angaben zu Mindestanforderungen gemacht werden, sind diese zirkulär begründet oder so fall- bzw. methodenspezi-

fisch (z.B. Lee et al., 2008; Johnson & Liscio, 2015; Larsen et al., 2008), dass sie nicht übertragbar sind. Es fehlt also auch ein systematisches Vorgehen zur fallspezifischen Ermittlung der Bildqualität und der daraus ableitbaren, tatsächlich erzielbaren Messgenauigkeit.

Bekannte Toleranzen sind essenziell für die Aussagekraft der Ergebnisse des digital-anthropometrischen Rigabgleichs. Entscheidend ist eine klare Trennung von Messunsicherheit und tatsächlichen Unterschieden zwischen Personen: Sind die gemessenen Unterschiede kleiner als die Messunsicherheit, können keine zuverlässigen Aussagen getroffen werden. Daher muss ein Toleranzbereich definiert werden, ab dem zuverlässige Unterscheidungen möglich sind. Die Gerichtsverwertbarkeit, sowohl hinsichtlich der Zulässigkeit als auch der Beweiskraft, erfordert zudem hohe Anforderungen an die Erfüllung wissenschaftlicher Kriterien wie Reproduzierbarkeit und Objektivierbarkeit forensischer Methoden, damit diese nachvollziehbar und überprüfbar sind (Cattaneo & Gibelli, 2022). Dies schließt objektive Bewertungskriterien bzw. -verfahren zur Interpretation der Ergebnisse mit ein (Seckiner et al., 2024). Subjektive Einschätzungen ohne quantitative Grundlage können daher die Gerichtsverwertbarkeit untergraben.

Dieser Beitrag entwickelt einen systematischen Ansatz zur genauigkeits- und funktionsbasierten Toleranzbestimmung, der Fehlerquellen identifiziert und deren Einfluss auf die Bildqualität quantifiziert. Ausgehend von der Frage, wie präzise eine sichtbare Objektgrenze (Kante) – also der Übergang zwischen Objekt und Hintergrund im Bild – bestimmt werden kann, mündet dieser Ansatz in die Festlegung quantitativer Bewertungskriterien für die forensische Verwertbarkeit von Bildmaterial, ein strukturiertes Vorgehen zu deren Bestimmung sowie die anschließende Berechnung der Messgenauigkeit in Abhängigkeit von der Kameradistanz.

Ein Fokus liegt dabei auf der Anwendbarkeit in der forensischen Praxis am Beispiel des digital-anthropometrischen Rigabgleichs, der die spezifischen Anforderungen an Bildqualität und Messgenauigkeit in diesem Beitrag definiert, während die entwickelte Methodik auf vergleichbare bildgestützte Verfahren übertragbar ist. Dazu wird vorhandenes interdisziplinäres Fachwissen (ISO 12233:2024, 2024; Schröder, 1981) in den forensischen Kontext übertragen, durch Anpassung an diesen nutzbar gemacht sowie methodisch zu einem kohärenten Verfahren integriert und funktional verknüpft.

Nach der Einleitung in diesem Kapitel werden in Kapitel 2 einige technische Grundlagen erläutert. Daraufhin wird in Kapitel 3 das methodische Vorgehen zur Einordnung der Bildqualität vorgestellt. Kapitel 4 ordnet diese Erkenntnisse in die Praxis ein, sodass in Kapitel 5 schließlich ein Fazit gezogen werden kann.

2 Technische Grundlagen

Die Faktoren, die bestimmen, wie gut etwas auf Bildmaterial erkennbar ist, sind vielzählig und vielseitig. Sie wirken fast nie isoliert, sondern bilden ein komplexes Gefüge von Ursache-Wirkung-Beziehungen, in dem alles miteinander verknüpft ist. Eine taxonomische Einordnung ist daher nur schwer generalisierbar und meist zweckabhän-

gig. Die folgende Systematisierung wird ohne Anspruch auf Vollständigkeit oder klarer Trennbarkeit vorgeschlagen – vielmehr dient sie der Darstellung der verschiedenen Einflussfaktoren und der Nachvollziehbarkeit, warum bestimmte Aspekte nicht Gegenstand dieses Beitrags sind. Die Unterscheidung erfolgt entlang der grundlegenden Ursache: An welcher Stellschraube müsste justiert werden, um die Eignung eines Frames gezielt herzustellen? Daher wird unterschieden zwischen Bildqualität und Objekt-/Subjektspezifität sowie verfügbarer Referenzinformation (Abbildung 1).

Die **verfügbare Referenzinformation** beschreibt das Vorhandensein (d.h. die reale Dimension ist bekannt), die Sichtbarkeit und Positionierung (im Verhältnis zum Zielobjekt/-subjekt) von Referenzobjekten oder -strukturen, die zur Rekonstruktion der durch die 2D-Projektion verlorenen Tiefeninformation benötigt werden (Heuschkel & Labudde, 2024). Die Anforderungen an die Referenzinformation sind methodenabhängig: Beim digital-anthropometrischen Rigabgleich wird sie durch das messbare 3D-Modell der Umgebung bereitgestellt, welches auch auf dem Frame sichtbar ist. Durch die Superimposition von Frame und 3D-Modell kann jeder Frame die erforderlichen Anforderungen an die Referenzinformation erfüllen.

Die **Bildqualität** wird durch die sogenannte Übertragungskette (Schröder, 1981, S. 43) bestimmt. Diese technische Bildgüte umfasst alle Schritte der Bildaufnahme und -verarbeitung, bei denen sich Qualitätsverluste kumulieren und das Gesamtergebnis beeinflussen können.

Die Objekt-/Subjektspezifität hingegen beschreibt Einflussfaktoren, die unmittelbar mit dem zu untersuchenden Objekt oder Subjekt zusammenhängen. Dazu zählen die Sichtbarkeit relevanter Merkmale, Bewegungsunschärfe, Pose und Position im Bild, Distanz zur Kamera, Perspektive sowie – im Fall des digital-anthropometrischen Rigabgleichs – die getragene Kleidung.

Einzelne Einflussfaktoren der Objekt-/Subjektspezifität werden auch durch Parameter der Übertragungskette mitgeprägt. So wird etwa das Ausmaß der Bewegungsunschärfe (Objekt-/Subjektspezifität) durch die Belichtungszeit (Übertragungskette) beeinflusst, während Perspektive und Bildposition (Objekt-/Subjektspezifität) im Zusammenspiel mit der Objektivwahl (Übertragungskette) eine zusätzliche Rolle spielen.

Optische Systeme lenken Lichtstrahlen durch Gläser und Spiegel so, dass sie auf einer Bildebene zusammentreffen. Dieser Vorgang wird als Projektion bezeichnet. Durch Beugung und Reflexion unterliegt diese Projektion physikalischen Limitierungen, die das Auflösungsvermögen bestimmen.

Auflösung beschreibt grundsätzlich die Anzahl kleinster unterscheidbarer Einheiten pro definierten Bereich und bestimmt, wie fein Details erfasst werden können. Der Begriff wird jedoch oft unpräzise verwendet, da verschiedene Aspekte der Übertragungskette unterschiedliche Arten von „Auflösung“ aufweisen.

Auf der Projektionsebene befindet sich zur Bildaufzeichnung ein digitaler Sensor mit einer bestimmten Sensorauflösung. Das vorgelagerte Objektiv liefert aufgrund seines optischen Aufbaus ein physikalisch begrenztes Auflösungsvermögen. Dieses bestimmt, mit welcher tatsächlichen Auflösung der Sensor das Bild aufzeichnen kann. Die

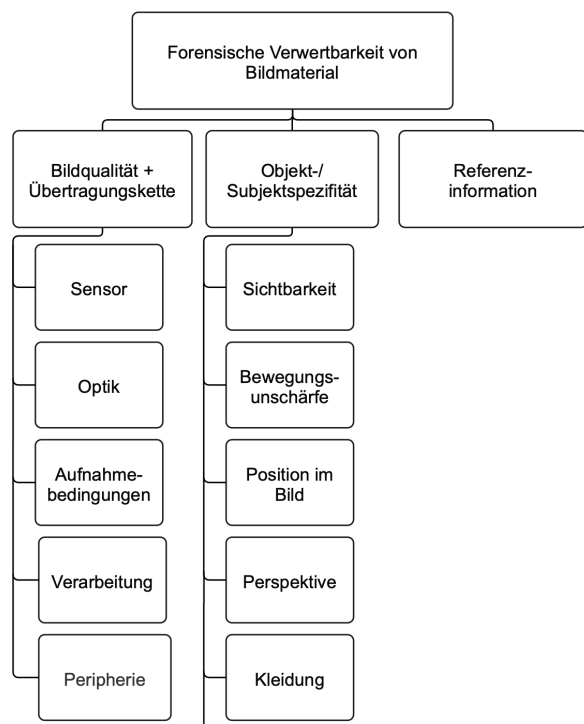


Abbildung 1: Einflussfaktoren auf die forensische Verwertbarkeit von Bildmaterial: Übertragungskette, Objekt- und Subjektspezifität sowie verfügbare Referenzinformation.

resultierende Bildauflösung bezeichnet die Anzahl der Pixel im gespeicherten Bild.

In der Optik beschreibt die Abbildungsleistung, wie gut das optische System feine Strukturen abbilden kann.

Sie wird über das Auflösungsvermögen gemessen, welches in Linienpaaren pro Millimeter angegeben wird. Diese Einheit gibt an, wie dicht schwarz-weiße Linienpaare beieinander liegen können, sodass diese noch voneinander differenzierbar sind. Das eintreffende Licht beugt sich an den Rändern der Optik, wodurch das Auflösungsvermögen durch Beugungsunschärfe physikalisch begrenzt wird. Dieser theoretische Grenzwert lässt sich berechnen mittels Gleichung 1.

$$1,22 \times \lambda \times k \quad (\text{Gl. 1})$$

Dabei ist λ die Wellenlänge des Lichts und k die Blendenzahl (das Verhältnis von Brennweite zu Blendenöffnung) darstellt (Schröder, 1981, S. 24). Die Konstante 1,22 ergibt sich aus dem Rayleigh-Kriterium, das definiert, wann zwei Lichtpunkte noch als getrennt wahrnehmbar sind. Für grünes Licht ($\lambda = 550\text{nm}$) bei Blende $f/2.0$ ergibt sich beispielsweise ein theoretisches Auflösungsvermögen von 750 lp/mm.

Das auf den Sensor projizierte Bild wird durch dessen Pixel, das sind die kleinsten lichtempfindlichen Einheiten digitaler Bildsensoren, erfasst und gemessen. Diese Pixel wandeln das eintreffende Licht in digitale Bildinformationen um. Hierbei limitiert die physikalische Größe der Pixel auf dem Sensor, wie fein das Auflösungsvermögen der Optik umgesetzt werden kann.

Die Pixelgröße ergibt sich aus dem Quotienten von Sensorgöße und Sensorauflösung (Anzahl der Pixel auf dem

Sensor). So hat beispielsweise der Vollformatsensor der *Sigma fp* eine Größe von 35,9 mm × 23,9 mm und eine Auflösung von 24 Megapixel, also 6.000 Pixel × 4.000 Pixel (Sigma, 2019). Daraus ergibt sich mit der Gleichung 2 eine physikalische Pixelbreite von etwa 0,00598 mm.

$$\frac{35,9 \text{ mm}}{6.000} \approx 0,00598 \text{ mm} \quad (\text{Gl. 2})$$

und ebenso eine gleiche Pixelhöhe mit der Gleichung 3.

$$\frac{23,9 \text{ mm}}{4.000} \approx 0,00598 \text{ mm}. \quad (\text{Gl. 3})$$

Für die Bestimmung des Auflösungsvermögens in lp/mm gilt, dass zur Darstellung eines Linienpaares (bestehend aus einer weißen und einer schwarzen Linie) mindestens zwei Pixel benötigt werden.

Liefert die Optik also ein höheres Auflösungsvermögen als 0,0119 mm oder umgerechnet $\approx 83,6$ lp/mm, kann der Sensor die zusätzlichen Informationen nicht aufzeichnen und die Sensorauflösung limitiert die Bildauflösung. Im umgekehrten Fall, wenn die Sensorauflösung das Auflösungsvermögen der Optik übertrifft, beinhaltet das resultierende Bild zwar mehr Pixel, jedoch nicht mehr Informationen. Eine feinere Sensorauflösung wäre sinnlos, da das Auflösungsvermögen der Optik erschöpft ist. Das maximal mögliche, effektive Bildauflösungsvermögen ergibt sich daher aus dem Zusammenspiel von Sensor und Optik – begrenzt durch das jeweils schwächere Glied. Dabei nutzt das gespeicherte Bild standardmäßig die volle Sensorauflösung aus. Somit sind üblicherweise die Bildauflösung und Sensorauflösung identisch.

Die Übertragungskette umfasst weiter den Hell-Dunkel-Kontrast (im Folgenden nur Kontrast genannt) als Maß für Helligkeitsunterschiede im Bild und Voraussetzung, um Unterschiede überhaupt zu detektieren, sowie die Schärfe. Sie gibt an, wie abrupt sich die Helligkeit von Punkt zu Punkt ändert – also wie steil der Helligkeitsverlauf ist. Diese Änderungsrate entspricht dem Gradienten (1. Ableitung) des Helligkeitsverlaufs, der an Kanten am stärksten ist. Die Bildauflösung bestimmt, wie granular der Verlauf gemessen werden kann.

Die Messbarkeit von Kanten ergibt sich aus dem Zusammenspiel dieser drei Parameter: Kontrast ermöglicht das Differenzieren, Schärfe das präzise Lokalisieren und Bildauflösung die Feinheit der Messung durch eine feinere Abtastung des Kontrastverlaufs. Eine höhere Bildauflösung allein macht das Bild nicht schärfer – sie ermöglicht nur, vorhandene Schärfe besser zu erfassen.

Für die forensische Anwendung, speziell die Lokalisierung von Gelenkpunkten des Rigs beim digital-anthropometrischen Rigabgleich, bedeutet dies: Mit höherer Auflösung lässt sich ein Punkt präziser bestimmen, vorausgesetzt ausreichend Kontrast und Schärfe sind vorhanden.

Die Übertragungskette umfasst weitere Faktoren der Aufnahmebedingungen: die Parameter des Belichtungsdreiecks (Blendenöffnung, Verschlusszeit, ISO-Wert), optische Verzeichnung, Brennweite und Entfernung zur Kamera. Hinzu kommen Aspekte der Bildverarbeitung und der Bildschirmauflösung, mit der das gespeicherte Bild dargestellt wird. Zusätzlich können Farbfehler, Reflexionen, Vignettierung, Projektionskrümmung und weitere optische Phänomene, Bewegungsunschärfe, Farbräume, Farb-

tiefe, Farbtreue sowie die Software des anzeigenden Computers die wahrgenommene Bildqualität beeinflussen. Die Liste lässt sich durch die Vielzahl optischer Phänomene erheblich erweitern. Der konkrete Umfang der beteiligten Faktoren ist situations- und fallabhängig.

Diese können jedoch alle theoretisch gesteuert werden. Das Auflösungsvermögen der Optik in Kombination mit den Sensoreigenschaften stellen die wichtigsten Faktoren für die Bildqualität dar, da diese Eigenschaften immer eine Rolle spielen und durch das gegebene optische System unveränderlich sind. Daher beschränken sich die hier durchgeführten Betrachtungen darauf.

Die anderen Faktoren wurden durch das im Folgenden beschriebene Setup kontrolliert oder so konfiguriert, dass sie die Bildauflösung nicht limitierten, wie durch gleichmäßige Ausleuchtung, Beibehaltung des RAW-Formats und Positionierung des Objektes in der Bildmitte.

2.1 Modular Transfer Function (MTF) als Messinstrument der Bildqualität

Da eine Kante zwar scharf, aber kontrastarm sein kann - wodurch eine Kantendetektion erschwert wäre - wird die Abbildungsleistung eines optischen Systems mittels sogenannter Modulation Transfer Functions (MTF) (ISO 12233:2024) beschrieben (Abbildung 2). Diese geben an, wie stark Kontraste in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz, gemessen in Linienpaaren pro Millimeter, abgebildet werden können. Ein Kontrastwert von 1 steht dabei für eine vollständige Kontrasterhaltung, ein Wert von 0 für keinen messbaren Kontrast zwischen den schwarz-weißen Linienpaaren (Schröder, 1981, S. 43).

Die **MTF-Kurve** beschreibt diesen Zusammenhang als Funktion einer bestimmten Ortsfrequenz mit:

- **X-Achse:** radiale Distanz vom Bildmittelpunkt zum Bildrand in mm.
- **Y-Achse:** Kontrastübertragungsfähigkeit (0 bis 1)

Je höher die Ortsfrequenz, desto schwieriger ist es für das optische System, den ursprünglichen Kontrast vollständig zu übertragen. Daher zeigt der Kurvenverlauf typischerweise einen hohen Kontrast bei niedriger Frequenz und einen Abfall bei steigender Frequenz.

MTF-Kurven beschreiben jedoch nicht nur die Abbildungsleistung des optischen Systems, sondern die Leistung durch die gesamten Übertragungskette. Sie beantworten die Frage, wie gut bei einer Aufnahme Details unterschiedlicher Größen sichtbar und messbar übertragen werden, und stellen damit ein Instrument zur quantitativen und objektivierbaren Bewertung der Bildqualität dar.

3 Bestimmung der Bildqualität über die Messgenauigkeit

Ein Experiment wurde durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit des entwickelten Verfahrens in der Praxis zu validieren und die Konsistenz zwischen theoretischen Berechnungen und praktischen Messungen zu prüfen.

Für das Experiment wurde die Kamera *Sigma fp* mit dem Objektiv *Sigma 65 mm f/2* verwendet. Der werkseitige Hot-Mirror-Filter (Infrarot-Sperrfilter) vor dem Sensor

wurde durch einen 280nm Highpass-Filter ersetzt, der UV- und Infrarotlicht durchlässt, wodurch die Kamera einen erweiterten Spektralbereich detektieren kann. Für die hier durchgeführten Messungen wurde jedoch zur Beschränkung auf das sichtbare Spektrum ein Hot-Mirror-Filter der Firma Kolari vor dem Objektiv angebracht.

3.1 Bestimmung der theoretischen Messgenauigkeit mittels MTF-Messung

Zunächst wurde das optische Auflösungsvermögen der Optik mittels MTF-Kurven bestimmt. Für diesen Zweck wurde ein standardisiertes MTF-Testchart (lensgrid_a0.pdf, bereitgestellt von der Software MTFMapper, (van den Bergh, 2019)) in Größe A0 ausgedruckt, laminiert an einer Wand befestigt und anschließend der Raum gleichmäßig ausgeleuchtet, um unter anderem Reflexionen zu vermeiden. Mit der parallel und mittig ausgerichteten Kamera wurden Aufnahmen des Charts in verschiedenen Blendenstufen angefertigt.

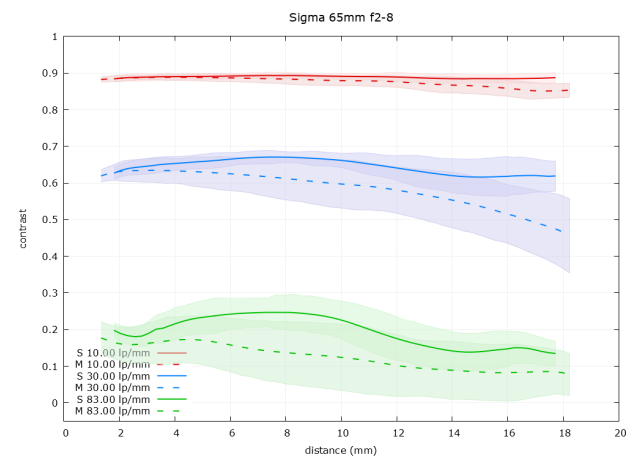


Abbildung 2: MTF-Kurve des Sigma 65mm f/2 Objektivs bei Blende f/2.8. Die Abbildung zeigt die gemessenen MTF-Kurven des verwendeten Objektivs in Abhängigkeit von der Position im Bildfeld.

Abbildung 2 zeigt die MTF-Messung für Blende f/2.8. Gegenüber den MTF-Angaben des Herstellers (Sigma, 2021) war eine deutliche Diskrepanz erkennbar, was auf abweichende Messbedingungen oder die modifizierte Kamera mit zusätzlichem Filter zurückzuführen sein könnte.

Bei der Messung war eine Orientierungsabweichung von wenigen Grad messbar (Abbildung 3). Durch diese Orientierungsabweichung ergab sich eine Streuung in den MTF-Messungen.

Laut der MTF-Messung in Abbildung 2 liefert die Optik einen maximalen Kontrast von 90 % bei 10 lp/mm. Wie weiter oben erwähnt, kann der verbaute Sensor der Sigma fp mit einer Pixelgröße von 0,00598 mm maximal 83,6 lp/mm auflösen (167,2 Pixel pro mm). Basierend auf diesem Wert wurde die MTF bei 83 lp/mm ermittelt. Wie in Abbildung 2 erkennbar ist, ist bei dieser Frequenz ein Kontrast von etwa 0,1 - 0,2 messbar. Ein MTF-Wert über Null bestätigt eine messbare Kontrastübertragung, demnach eine pixelgenaue Messung mit diesem optischen System möglich sein sollte.

3.2 Bestimmung der Messgenauigkeit in der Praxis

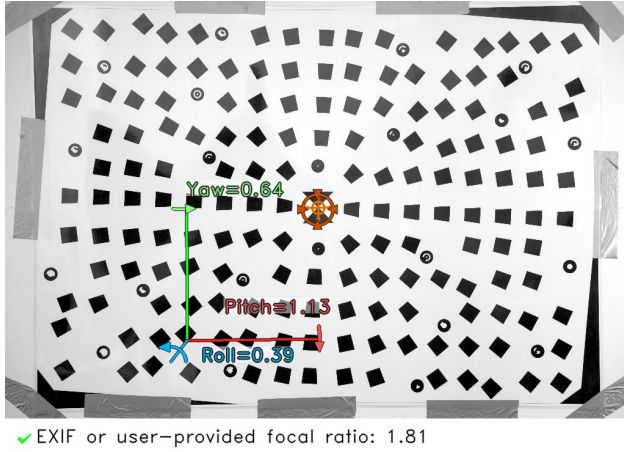


Abbildung 3: Fotografie des MTF-Testchart (lensgrid_a0.pdf, bereitgestellt von der Software MTFMapper, „lensgrid_A0“ (van den Bergh, 2019)) mit gemessener Orientierungsabweichung.

Auf einem Messbrett wurden im Abstand von einem Meter (mit einer Genauigkeit von 1 mm) zwei Kanten zwischen schwarzen und weißen Flächen aufgebracht. Bei den Aufnahmen waren der Kamerasensor und das Referenzmessbrett parallel zueinander ausgerichtet und gleichmäßig ausgeleuchtet. Im Außenbereich wurden auf zwei verschiedenen Distanzen Aufnahmen des Messbretts mit $f/2.8$ und $f/22$ erstellt. Auf die Kontrolle der Aufnahmebedingungen wurde geachtet, insbesondere auf gleichmäßige Ausleuchtung sowie die Positionierung des Messbretts in der Bildmitte zur Vermeidung perspektivischer Verzerrung. Durch die MTF-Messung ließ sich feststellen, dass die Optik bei $f/2.8$ die höchste Schärfe aufwies. Da auch bei 83 lp/mm ein Kontrast messbar war, sollte eine pixelgenaue Messung möglich sein. Bei $f/22$ lieferte das Objektiv aufgrund der Beugungsunschärfe die geringste Abbildungsleistung. Hier wäre eine pixelgenaue Messung nicht mehr zuverlässig möglich – es wären mehrere Pixel notwendig, um präzise zu messen. Aus der Pixelgröße des Sensors, der Brennweite des Objektivs und der zu messenden Objektgröße von beispielsweise 1 cm ergab sich eine maximale Distanz, bei der ein Pixel genau 1 cm entspricht. Bei einer anderen gewählten Genauigkeit ergäbe sich eine entsprechend abweichende maximale Distanz. Berechnen lässt sich die Distanz d mit der Gleichung 4.

$$d = \frac{f \cdot l_o \cdot p_s}{l_s \cdot p_o} \quad (\text{Gl. 4})$$

mit der Brennweite f , der Objektlänge l_o , der Pixelanzahl des Sensors p_s , der Sensorlänge l_s und Pixelanzahl des fotografierten Objekts p_o . Für die verwendete Kamera und der Anforderung von 1 cm Genauigkeit ergab sich mit Gleichung 5 eine Distanz von 108,635 m.

$$d = \frac{65 \text{ mm} \cdot 1000 \text{ mm} \cdot 6000}{35,9 \text{ mm} \cdot 100} = 108635 \text{ mm} \quad (\text{Gl. 5})$$

Folglich war in einer Distanz von 108,635 m eine pixelgenaue Auflösung von 1 cm zu erwarten. Die Distanz wurde

mangels eines langen Maßbandes inkrementell mit einer Schnur gemessen. Ein Ausschnitt des in dieser Entfernung erstellten Bildes ist in Abbildung 4 dargestellt.

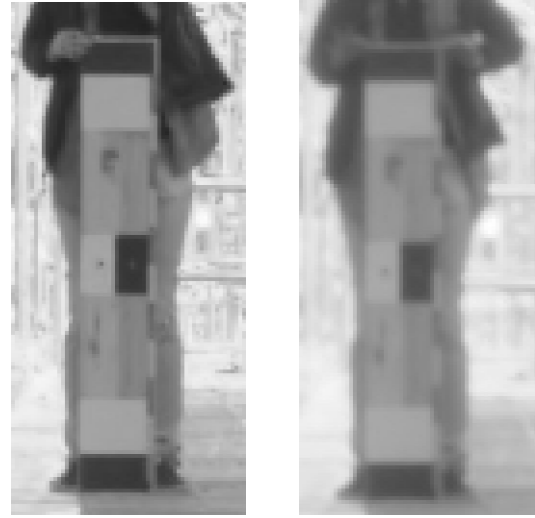


Abbildung 4: Grünkanal auf 108,635 m mit $f2.8$ und $f22$ (Bildausschnitt). Die horizontalen Linien zwischen den schwarz-weißen Feldern sind 1 m voneinander entfernt. Deutlich zu erkennen ist der Qualitätsverlust im rechten Bild durch die Beugungsunschärfe bei $f/22$.

3.3 Gradientenbasierte Kantenlokalisierung

Für die Bestimmung der exakten Position einer Kante im Bild wurde der Helligkeitsgradient senkrecht zur Kantenrichtung analysiert. Für die Berechnung dieses Gradienten wurde der etablierte Sobel-Operator (Israni & Jain, 2016) verwendet, eine 3×3 -Matrix, die die systematisch über alle Bildpixel angewendet wird und die Helligkeitsunterschiede zwischen dem aktuellen Pixel und seinen Nachbarn berechnet. Die Kante liegt dort, wo der Gradientenwert sein Maximum erreicht. Die Erfassung der Pixeldistanz zwischen den Kontrastkanten erfolgte auf dem grünen Farbkanal. Grün wurde gewählt, da bei der Bayer-Matrix - dem Farbfilterarray digitaler Sensoren - grüne Pixel doppelt so häufig vorhanden sind wie rote oder blaue, wodurch dieser Farbkanal das geringste Rauschen aufweist und am besten für präzise Messungen geeignet ist.

Optional kann die genaue Position der Kante durch Interpolation zwischen benachbarten Pixeln auf Subpixel-Ebene bestimmt und die Kante damit mit höherer Genauigkeit lokalisiert werden, da der maximale Gradient meist nicht exakt auf einem einzelnen Pixel liegt. In den Tabellen 1-3 sind die Gradientenwerte bei unterschiedlichen Distanzen und Blenden hinterlegt.

Bei einer Distanz von 108,635 m auf $f2.8$ in Tabelle 1 erreicht der Gradient an der oberen Kante bei Pixel 93 sein Maximum. An der unteren Kante liegt das Maximum bei Pixel 193. Somit ergibt sich eine gemessene Distanz von 100 Pixeln, was exakt den realen 100 cm entsprach.

Tabelle 1: Gradient bei 108,635 m auf f2.8

Obere Kante		Untere Kante	
Pixel y	Gradient	Pixel y	Gradient
90	5	190	-59,6
91	32,7	191	-296,8
92	261,4	192	-332,7
93	364	193	-103,9
94	146,4	194	-14,2

Der Gradient der Aufnahme mit f22 bei 108,635 m in Tabelle 2 verdeutlicht den Abbildungsleistungsverlust. Gegenüber Tabelle 1 ist erkennbar, dass die Kontrastkante deutlich unschärfer abgebildet wurde. Der Gradient erreicht an der oberen Kante bei Pixel 64 das Maximum und an der unteren Kante bei Pixel 163 das Minimum. Dies ergibt eine gemessene Distanz von 99 Pixeln, entsprechend 99 cm. Die Beugungsunschärfe verursachte somit eine messbare Abweichung von 1 cm.

Obwohl in diesem Fall nur ein geringfügig abweichender Wert ermittelt wurde, bedeutete die Unschärfe, dass feinste Details nicht mehr messbar sind. So sind in Abbildung 4 die aufgeklebten Marker, die auch beim digital-anthropometrischen Rigabgleich verwendet werden, in der Bildmitte nicht mehr klar abgrenzbar. In praktischen Anwendungen könnte so beispielsweise nicht mehr zwischen einem kleinen Objekt mit hohem Kontrast und einem großen Objekt mit geringem Kontrast unterschieden werden. Die Bestimmung des Mittelpunkts blieb jedoch, wie die Längenmessung des Meters zeigte, ausreichend präzise.

Tabelle 2: Gradient bei 108,635 m auf f22

Obere Kante		Untere Kante	
Pixel y	Gradient	Pixel y	Gradient
59	6,8	159	-8,7
60	22,2	160	-12,6
61	28,7	161	-53,2
62	61,8	162	-159,1
63	179	163	-229
64	222	164	-159,9
65	126,8	165	-48,2
66	37,7	166	-8,9
67	2,6	167	-7

Bei der Messung in 150 m Entfernung auf f2.8 (Tabelle 3) wurde eine Länge von 72 Pixeln gemessen, was 99,415 cm entspricht. Dies ergibt eine Abweichung von 5,8 mm gegenüber den realen 100 cm. Obwohl die 72 Pixel technisch genaueste Messergebnis bei 150 m Entfernung entsprachen, konnte hier mit einer Abweichung von 5,8 mm keine zentimetergenaue Messung +/- 5 mm mehr gewährleistet werden.

Tabelle 3: Gradient bei 150 m auf f2.8

Obere Kante		Untere Kante	
Pixel y	Gradient	Pixel y	Gradient
10	14	81	-3,9
11	27,1	82	-4,1
12	249,7	83	-41,1
13	393	84	-313,3
14	170,3	85	-372,3
15	5	86	-99,9

4 Anwendung in der forensischen Praxis

Die Bildqualität wird über MTF-Kurven charakterisiert, die Bewertungskriterien werden jedoch quantitativ über die Messgenauigkeit bestimmt. Die Festlegung der benötigten Messgenauigkeit und der Toleranzen ergibt sich aus der jeweiligen Fragestellung und den geltenden Rahmenbedingungen. Alle Faktoren der Übertragungskette wirken zusammen und manifestieren sich in einem einzigen Parameter: der erzielbaren Messgenauigkeit. Diese wird auch durch Objektgröße und Kameradistanz mitbestimmt. Jede Systemkomponente kann einen von den anderen nicht separierbaren Einfluss ausüben. Folglich erfordert die Veränderung eines Faktors eine neue Messung - mindestens im forensischen Anwendungsbereich, wo die Genauigkeit möglichst unabhängig von nicht überprüfbaren Annahmen modelliert werden sollte.

Die Bildqualität ist somit fallspezifisch und muss für jeden Fall neu ermittelt werden. Verlässliche Referenzwerte stellen eine Herausforderung dar, weil die Zusammensetzung der Übertragungskette einschließlich des optischen Systems stark variabel ist. Ihre Verwendung bringt methodische Unsicherheiten mit sich, die eine fallspezifische Einzelmessung oftmals rechtfertigen.

4.1 Anwendung beim digital-anthropometrischen Rigabgleich

Die praktische Anwendung des entwickelten Verfahrens beim digital-anthropometrischen Rigabgleich gestaltet sich folgendermaßen:

Eine oder mehrere Zielpersonen werden mit der Überwachungskamera aufgezeichnet. Das Videomaterial lässt sich in Einzelbilder (Frames) zerlegen, auf denen die Zielperson in unterschiedlichen Bereichen des Bildausschnitts und möglicherweise in verschiedenen Distanzen zur Kamera abgebildet ist. Um die Eignung dieser Frames für die Extraktion der Gelenkpunkte des Rigs zu ermitteln, wird zunächst das MTF-Testchart mit der Überwachungskamera aufgenommen. Die Aufnahmebedingungen sollten dabei möglichst reproduziert werden – sowohl die intrinsischen und extrinsischen Kameraeinstellungen der zu analysierenden Frames als auch die Lichtverhältnisse und Wetterbedingungen, die zur Tatzeit herrschten.

Weisen die zu analysierenden Frames unterschiedliche Aufnahmebedingungen auf, ist für jede Bedingung eine separate Aufnahme des Testcharts erforderlich. Alternativ kann ein pragmatischeres Vorgehen gewählt werden: Die

schlechtesten Aufnahmebedingungen werden geprüft – ist die Bildqualität unter diesen Bedingungen ausreichend, ist sie auch für bessere Bedingungen gewährleistet.

Das Testchart sollte so dimensioniert und positioniert werden, dass es den gesamten relevanten Kamerabereich abdeckt. Andernfalls kann der Bereich durch mehrere Charts erfasst und die resultierenden MTF-Kurven zusammengefügt werden. Bei der photogrammetrischen Vermessung der Testperson werden runde Marker mit bis zu 2 cm Durchmesser verwendet (s. auch Abbildung 4 in der Bildmitte), deren Mittelpunkte die Gelenkpunkte des Rigs definieren. Für das Rig der Zielperson, bei der keine physischen Marker sichtbar sind, wird zur Gewährleistung der Kompatibilität zwischen den Rigs der Test- und Zielperson derselbe Referenzwert von 1 cm Radius (entsprechend 2 cm Durchmesser) als Messgenauigkeit für die Gelenkpunktbestimmung verwendet, wobei die Punktsetzung innerhalb dieses Radius erfolgen sollte.

Mit der oben angeführten Gleichung Gl.4 lässt sich nun berechnen, wie groß das Objekt auf dem Sensor abgebildet wird. Als Distanz für die Berechnung ist die maximale Entfernung aus allen zu analysierenden Frames zu verwenden. Da die Distanz der Person zur Kamera aufgrund der fehlenden Tiefeninformation nur abgeschätzt werden kann, sollte eine Referenz in der Umgebung zur Distanzbestimmung herangezogen werden.

Im Fall des Experiments wurde als Wert für die Ortsfrequenz die in lp/mm umgerechnete maximale Sensorleistung verwendet, die im optischen System und in der gesamten Übertragungskette – bedingt durch die kontrollierten Aufnahmebedingungen – den limitierenden Faktor darstellte. Die hier gewählte Anforderung einer pixelgenauen Messung für 1 cm stellt dabei eine anpassbare Festlegung dar, die je nach Anwendungsfall definiert werden kann. Die festgelegte Genauigkeitsanforderung fließt in die Gleichung Gl.4 als Faktor der Objektlänge l_o ein. Bei gegebener Distanz ließe sich daraus die für die Genauigkeit nötige Pixelanzahl p_o berechnen. Anschließend lässt sich daraus die entsprechende Frequenz in lp/mm ableiten. Anhand der MTF-Kurve bei dieser Frequenz wird geprüft, ob noch ein messbarer Kontrastwert vorliegt. Ist das der Fall, kann die Objektkante anhand des Helligkeitsgradienten im Bild lokalisiert werden. Beim digital-anthropometrischen Rigabgleich lassen sich in der Praxis Randpunkte wie Kopf- oder Schulterpunkte mittels Kantenbestimmung zuverlässig setzen. Weitere Gelenkpunkte hingegen befinden sich häufig nicht am Rand, sondern innerhalb der Körperfläche. In solchen Fällen kann die Kantenbestimmung nur indirekt zur Lokalisierung beitragen: Der Gradient dient dabei zur Erfassung der Grenze zwischen Körper und Hintergrund im relevanten Bereich, während der genaue Punkt durch eine zusätzliche, generalisierbare Vorschrift lokalisiert wird.

5 Bedeutung

Das beschriebene Vorgehen ermöglicht eine quantitative Bestimmung der Bildqualität, einschließlich definierter Toleranzen und Messgenauigkeit, die spezifisch auf Objektgröße, Distanz und Aufnahmebedingungen abgestimmt werden kann und muss. Es stellt eine standardisierte Vorgehensweise (SOP) dar, die flexibel genug ist,

um fallspezifische Grenzen festzulegen, wie es für forensische Analysen notwendig ist. Gleichzeitig erfordert der Ablauf die Rekonstruktion der Aufnahmebedingungen oder zumindest ein Mindest-Setup, das alle relevanten Frames abdeckt.

Das Verfahren liefert objektive, nachvollziehbare und quantitative Aussagen zur Eignung von Frames für den digital-anthropometrischen Rigabgleich. Dadurch kann bestimmt werden, bis zu welcher Kameradistanz eine Gelenkpunktsetzung mit bis zu 1 cm Genauigkeit möglich ist. Durch die Quantifizierung von Fehlerintervallen wird die Aussagekraft der Ergebnisse erhöht, da Fehlereinflüsse klar von tatsächlichen Unterschieden zwischen Personen abgegrenzt werden können. Die Frame-Eignung wird jedoch auch von Subjekt- oder Objektspezifität beeinflusst, die subjektiv bewertet werden muss und nicht vollständig von dem Verfahren abgedeckt ist. Eine objektive, automatisierte Punktsetzung durch gradientenbasierte Kantenbestimmung ist zudem nicht für alle Gelenkpunkte möglich und erfordert zusätzliche Maßnahmen.

5.1 Limitationen und Herausforderungen

Das mehrstufige Verfahren führt dazu, dass Aussagen zur Bildqualität und Messgenauigkeit von Fehlern in Zwischenschritten beeinflusst werden können. MTF-Aufnahmen unter abweichenden Bedingungen sind oft nicht übertragbar, da die Einflussfaktoren nicht einzeln über MTF quantifizierbar sind, was die Abgrenzung ihrer Wirkung erschwert. Das Verfahren funktioniert am besten, wenn bereits in einem Setup mit Minimalbedingungen sowie maximaler Distanz die möglichen Rahmenbedingungen abgedeckt sind. Andernfalls ist eine iterative Wiederholung mit verschiedenen Konfigurationen nötig, um die Grenzen der Bildqualität zu bestimmen. Schwierigkeiten entstehen, wenn Aufnahmebedingungen nicht rekonstruiert werden können oder der Bezug der MTF-Kurven zu den Frames unklar bleibt – typische Probleme, die im Zusammenhang mit Rekonstruktion stehen – einem Kernbereich forensischer Fallarbeit.

Bezogen auf das hier durchgeführte Experiment boten die schrittweise vorgenommenen Distanzmessungen mögliche Fehlerquellen; eine einmalige Messung mit einem ausreichend langen Maßband hätte diese minimieren können. Eine weitere potenzielle Erweiterung bestünde darin, die Messgenauigkeit durch subpixelgenaue Gradientenbestimmung weiter zu erhöhen.

5.2 Fazit

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht eine reproduzierbare, auf physikalischen und mathematischen Prinzipien basierende, quantitative Messung der Bildqualität von Frames sowie die Berechnung der Messgenauigkeit. Es unterstützt die Auswahl geeigneten bzw. den Ausschluss ungeeigneten digitalen 2D-Materials und ermöglicht eine objektive, automatisierbare Kantenbestimmung.

Trotz der Notwendigkeit fallspezifischer, teils iterativer Tests ohne verallgemeinerbare Referenzwerte ist es praxistauglich. Für die Praxis gilt, durch die Berücksichtigung möglichst weniger plausibler Ausgangslagen ein Spektrum abzubilden, das die tatsächlichen Bedingungen einschließt. Dieses Verfahren ermöglicht weiter flexible, quantitative

Aussagen zu Einflüssen des optischen Systems, der Aufnahmebedingungen, Distanz und Objektgröße, die sich bei Vergleichen von personenspezifischen Abweichungen trennen lassen. Dadurch wird die Aussagekraft und gerichtliche Verwertbarkeit bildgestützter Beweiserhebungen, wie des digital-anthropometrischen Rigabgleichs, gestärkt. Es bündelt die komplexen Wechselwirkungen zahlreicher Parameter in einem Wert zur Beurteilung der Bildqualität, erfordert jedoch eine Rekonstruktion der Aufnahmebedingungen, da Einflussfaktoren nicht trennbar sind. Ist diese unzureichend, entstehen praktische Hürden - eine typische Herausforderung der Forensik.

Ungeachtet dessen bietet das Vorgehen einen standardisierten, reproduzierbaren Test zur Qualitätsbewertung. Die Arbeit leistet einen interdisziplinären Beitrag, indem sie einen systematischen Transfer von Methoden der optischen Messtechnik, digitalen Bildverarbeitung und Computer Vision in die Forensik ermöglicht, Fallspezifität mit Standardisierung verbindet und subjektive Bewertungen reduziert.

Literaturverzeichnis

- Becker, S., Heuschkel, M. L., Richter, S., & Labudde, D. (2022). COMBI: Künstliche Intelligenz für die computerbasierte forensische Analyse von Personen. KI – Künstliche Intelligenz, 36(2), 171–180. <https://doi.org/10.1007/s13218-022-00761-x>
- Cattaneo, C., & Gibelli, D. (2022). Forensic Anthropology. In B. Madea (Hrsg.), Handbook of Forensic Medicine (S. 1234–1260). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119648628.CH65>
- Criminisi, A., Zisserman, A., van Gool, L., Bramble, S., & Compton, D. (1999). New approach to obtain height measurements from video. In Proceedings Volume 3576: Investigation and Forensic Science Technologies. <https://doi.org/10.1117/12.334540>
- Engelhard, J., Heuschkel, M.-L., Richter, S., Schiemann, A., & Labudde, D. (2024). Digital-anthropometrischer Rigabgleich als forensisches Instrument zur bildgestützten, biometrischen Personenidentifizierung. Kriminalistik, 78(5), 1–10.
- Gibelli, D., Obertová, Z., Ritz-Timme, S., Gabriel, P., Arent, T., Ratnayake, M., De Angelis, D., & Cattaneo, C. (2016). The identification of living persons on images: A literature review. Legal Medicine, 19, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2016.02.001>
- Heuschkel, M. L., & Labudde, D. (2024). Reconsideration of Bertillonage in the age of digitalisation: Digital anthropometric patterns as a promising method for establishing identity. Forensic Science International: Synergy, 8, 100452. <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2023.100452>
- ISO 12233:2024. (2024). Photography – Digital still cameras – Resolution and spatial frequency response. International Organization for Standardization.
- Israni, S., & Jain, S. (2016). Edge detection of license plate using Sobel operator. In Proceedings of the 2016 International Conference on Electrical, Electronics and Optimization Techniques (ICEEOT) (S. 3561–3563). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755367>
- Johnson, M., & Liscio, E. (2015). Suspect height estimation using the Faro Focus3D laser scanner. Journal of Forensic Sciences, 60, 1582–1588. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.12829>
- Larsen, P., Hansen, L., Simonsen, E., & Lynnerup, N. (2008). Variability of bodily measures of normally dressed people using PhotoModeler® Pro 5. Journal of Forensic Sciences, 53, 1393–1399. <https://doi.org/10.1111/J.1556-4029.2008.00874.X>
- Lee, J., Lee, E.-D., Tark, H.-O., Hwang, J.-W., & Yoon, D.-Y. (2008). Efficient height measurement method of surveillance camera image. Forensic Science International, 177, 17–23. <https://doi.org/10.1016/J.FORSCIINT.2007.10.008>
- Nielsen, M., Lynnerup, N., & Larsen, P. K. (2019). Forensic anthropological video-based cases at the Department of Forensic Medicine, University of Copenhagen: A 10-year retrospective review. Scandinavian Journal of Forensic Science, 25(1), 9–13. <https://doi.org/10.2478/sjfs-2019-0003>
- Russo, P., Gualdi-Russo, E., Pellegrinelli, A., Balboni, J., & Furini, A. (2017). A new approach to obtain metric data from video surveillance: Preliminary evaluation of a low-cost stereo-photogrammetric system. Forensic Science International, 271, 59–67. <https://doi.org/10.1016/J.FORSCIINT.2016.12.023>
- Seckiner, D., Mallett, X., Roux, C., Gittelsohn, S., Maynard, P., & Meuwly, D. (2024). Forensic interpretation framework for body and gait analysis: Feature extraction, frequency and distinctiveness. Australian Journal of Forensic Sciences, 56(4), 338–354. <https://doi.org/10.1080/00450618.2022.2161636>
- SIGMA (2019). SIGMA 65mm F2 DG DN | Contemporary – Technische Daten. SIGMA Deutschland GmbH. Abgerufen am 11. August 2025, von <https://www.sigma-foto.de/objektive/65mm-f2-dg-dn-contemporary/technische-daten/#ppc>
- SIGMA (2021). SIGMA fp – Technische Daten. SIGMA Deutschland GmbH. Abgerufen am 11. August 2025, von <https://www.sigma-foto.de/kameras/spiegellose-systemkameras/fp/technische-daten/>
- Schröder, G. (1981). Technische Fotografie: Grundlagen und Anwendungen in Technik und Wissenschaft. Würzburg: Vogel-Verlag. ISBN 3-8023-0144-7
- van den Bergh, F. (2019). MTF Mapper user guide. Abgerufen am 11. August 2025, von https://sourceforge.net/projects/mtfmapper/files/mtf_mapper_user_guide.pdf/download

Generative KI als Assistenz: Nutzungsperspektiven und Reflexionen der NextGen-Wissenschaftler:innen

Kompetente KI-Nutzung durch Peer-Learning in einem hochschulischen Qualifizierungsprogramm

Ramona Kusche, Karoline Buchner, Kerstin Strangfeld, Angela Freche
Kontakt: Ramona Kusche, Hochschule Mittweida, kusche@hs-mittweida.de

Zusammenfassung

Der Einsatz von Werkzeugen basierend auf generativer Künstlicher Intelligenz (genKI-Tools) hat sich seit ihrer breiten Verfügbarkeit rasant im Hochschulkontext etabliert. Während Studien häufig auf die Perspektive der Studierenden fokussieren, untersucht dieser Beitrag auf Basis qualitativer Fokusgruppeninterviews mit Promovierenden und Postdocs an einer Hochschule für angewandte Wissenschaften, wie sich genKI als Assistenz in Forschung, Lehre und Verwaltung etabliert. Im Mittelpunkt stehen Fragen nach Nutzungsmustern, Kompetenzerfordernissen und Herausforderungen im Umgang mit genKI-Tools in der Lehre. Die Ergebnisse zeigen, dass erfahrene Nutzer:innen bereits differenzierte Strategien zur Einbindung von KI in den Arbeitsalltag entwickelt haben. Diese kompetente Nutzung erfordert aber ein hohes Maß an kritischer Reflexion und fachlicher Expertise. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Vermittlung eines reflektierten Assistenzverständnisses gegenüber Studierenden eine zentrale, aber noch ungelöste Herausforderung darstellt. Peer-Learning, insbesondere in Form KI-fokussierter Peer Group Sessions, erwies sich als relevantes Instrument zur gemeinschaftlichen Erprobung und kritischen Auseinandersetzung mit KI-Tools.

Keywords: Personalentwicklung, Hochschulforschung, genKI-Tools, KI-Assistenz, KI-Kompetenz, Peer-Learning, Herausforderung der KI-Nutzung, genKI in der Forschung, genKI in der Lehre, Professoraler Nachwuchs, Nachwuchsentwicklung.

1 Einführung

In den vergangenen Ausgaben des NextGen Scientific Review wurden die im Qualifizierungsprogramm NextGen der Hochschule Mittweida (HSMW) zur Anwendung kommenden Peer-Learning-Formate untersucht (Kusche et al., 2023, 2024, 2025). In NextGen werden Wissenschaftler:innen unterschiedlicher Fachdisziplinen und Karrierestufen auf ihrem Weg zur Berufungsfähigkeit für eine Professur an Hochschulen für angewandte Wissenschaften (HAW) unterstützt und gefördert. Wichtiger Bestandteil des Qualifizierungsprogramms sind verschiedene Peer-Learning-Formate, darunter insbesondere das Format der Peer Group Sessions (PGS). In diesem institutionalisierten Format bereiten ein oder mehrere Teammitglieder ein für die Berufungsfähigkeit relevantes Thema auf und präsentieren es für die anderen (gleichrangigen) Teammitglieder, ggf. mit anschließendem Praxisteil und Erfahrungsaustausch. In den vergangenen Erhebungen wurde deutlich, dass die Mehrwerte der PGS in der Erweiterung der Blickwinkel

auf wissenschaftliche Fragestellungen, dem Kennenlernen neuer Forschungs- und Lösungsansätze sowie der Bereitstellung von Räumen zum Ausprobieren und für direktes Feedback bestehen. Im vorliegenden Beitrag wird nun auf diesen ersten Erhebungen aufbauend und basierend auf Fokusgruppeninterviews der Umgang der NextGen-Teammitglieder mit sogenannten genKI-Tools untersucht und das Potenzial des Peer-Learning für die Vermittlung von KI-Wissen und -Fertigkeiten diskutiert. Durch die Positionierung der HSMW als Standort für KI-Entwicklung und -Forschung, mit dem Ziel, künstliche Intelligenz integral in Lehre, Forschung und Hochschulmanagement zu verankern und den akademischen Nachwuchs in diesem Bereich zu fördern (Hochschule Mittweida, 2022), bieten die Ergebnisse einen Einblick in eine im Umgang mit KI-Werkzeugen bereits vergleichsweise geschulte Nutzer:innengruppe. Mit KI-Werkzeugen sind in diesem Beitrag generative KI-Anwendungen (genKI-Tools) gemeint, die auf großen Sprachmodellen (LLMs) oder vergleichbaren Architekturen basieren und dazu in der Lage sind, neue Inhalte wie Texte, Bilder oder Präsentationen zu erzeugen, wobei sie sprachliche oder visuelle Muster aus Trainingsdaten reproduzieren und kombinieren.

2 Hintergrund und Literaturüberblick

2.1 genKI-Tools an deutschen Hochschulen

Seit der Veröffentlichung von ChatGPT im Herbst 2022 haben sich genKI-Tools fest im Hochschulbereich etabliert. Eine erste Welle an Studien zur KI-Nutzung wurde inzwischen durch Folgestudien ergänzt, die Trends sowie nachhaltige Potenziale und Probleme aufzeigen (Buck, Jost, Kreis-Hoyer & Limburg, 2023; vgl. z.B. Budde, Tobor & Friedrich J., 2024). So nutzen laut Garrel und Mayer (2025) inzwischen über 90% der Studierenden genKI im Rahmen ihres Studiums, im Vergleich zu 63% im Jahr 2023 (Garrel & Mayer, 2023). Auch unter Lehrenden steigt der Anteil der Nutzer:innen, insbesondere im Bereich der häufigen Anwendung (insgesamt von 23% auf 34%, Bartels et al., 2024; Preiß et al., 2023), und die Anwendungsfelder diversifizieren sich: von Übersetzungshilfen über die automatisierte Beantwortung häufiger Anfragen bis hin zur aktiven Einbindung in die Lehre (Garrel & Mayer, 2025; Salden et al., 2024; Soltyska et al., 2024; Tobor, 2024). Diese verstärkte und immer breiter gefächerte Nutzung von KI bringt jedoch Regulierungs- und Unterstützungsbedarfe mit sich. Während durchaus positive Entwicklungen in der Unterstützung durch Hochschulen zu verzeichnen sind, z.B. hinsichtlich einer Vergrößerung des Angebots von KI-Workshops und Weiterbildungen, gibt es an anderer Stelle weiterhin großen Handlungsdruck, z.B. in der Vermittlung von KI-Kompetenz an

Studierende (Budde et al., 2024). Die Lage bleibt heterogen, hochschulkontextabhängig und hochgradig wandelbar.

Die meisten Erhebungen im deutschsprachigen Raum fokussieren auf Ansichten und Nutzungsverhalten von Studierenden, nur wenige beziehen Lehrende ein (z. B. Bartels et al. 2024; Preiß et al. 2023). Der vorliegende Beitrag beleuchtet im Rahmen einer explorativen qualitativen Erhebung exemplarisch, wie Promovierende und Postdocs nach mehreren Jahren genKI-Erfahrung ihren Umgang mit diesen Tools in den Aufgabenbereichen Forschung, Lehre und Verwaltung gestalten. Im Zentrum steht der Begriff der Assistenz, der sich als emischer Begriff in den Fokusgruppeninterviews herauskristallisierte. Die Vorstellung von KI als assistierender, maschineller Gegenpart zu menschlicher Expertise ist dabei keineswegs neu: Graßl et al. (2022) beschreiben KI-Assistenz etwa im Journalismus nicht als „autonomes System“, sondern als wechselseitige Beziehung zwischen künstlicher und menschlicher Intelligenz. Sie definieren diese Assistenz als „ein technisch-fundierter, individuell angepasster und durch Perma-Feedback trainierter Pool verschiedener Tools in ständiger Weiterentwicklung“ (ebd., 6), wobei Verantwortung und „Hoheit“ klar bei den menschlichen Anwender:innen liegen.

2.2 Mensch-KI-Beziehungen in der Literatur

Ein vollständiger Überblick über den stetig wachsenden Literaturkorpus zu Nutzungsweisen von genKI-Tools unter sogenannten „Wissensarbeiter:innen“ (engl. *knowledge workers*) ist hier nicht leistbar. Deutlich wird jedoch: Sowohl empirische als auch konzeptuelle Beiträge nehmen verstärkt die (idealtypischen) Mensch-KI-Beziehungen in den Blick. So unterscheiden Aumüller et al. (2024) drei Rollen eines „Human-AI Hybrids“ in Forschung und Lehre: als „Dominator“ (KI entscheidet autonom), „Facilitator“ (Mensch und KI entscheiden gemeinsam) und „Operator“ (KI assistiert, der Mensch entscheidet; ebd., 62f.). Zugleich mahnen erste Studien zur Vorsicht: Sie verweisen etwa auf potenziell negative Effekte eines übermäßigen „cognitive offloading“ auf das kritische Denken (Lee et al., 2025) oder – wie ein im Juni 2025 viral gegangenes Preprint – auf veränderte neuronale Konnektivität bei häufiger LLM-Nutzung (Kosmyrna et al., 2025). Diese Befunde unterstreichen die Bedeutung einer klaren Rollenverteilung, bei der KI bevorzugt als reine Assistenz fungieren sollte. In diesem Artikel wird auf qualitativer Datengrundlage exploriert, wie diese Rolle der Assistenz aus Sicht einer kleinen Stichprobe von Wissenschaftler:innen aussehen könnte bzw. in der Praxis bereits aussieht. Es wird die mögliche Rolle des Peer-Learning in der Vermittlung dieses Rollenverständnisses diskutiert sowie die Schwierigkeiten dieser Vermittlung in der Hochschullehre gegenüber einer Generation von Studierenden, die seit Beginn ihrer Hochschulbildung von KI begleitet wird.

Dieses Verständnis von Assistenz unterscheidet sich teils von sogenannten digitalen Assistenzsystemen, wie sie etwa in der Industrie zur Optimierung von Abläufen (vgl. Lensing, 2016) oder zur Förderung von Inklusion, z.B. für Menschen mit Behinderung, eingesetzt werden (Kreider et al., 2023). Im vorliegenden Artikel beschreibt der Begriff keine abgeschlossenen, zweckgebundenen Systeme, sondern eine wechselseitige, hierarchisch strukturierte Beziehung zwischen Wissenschaftler:innen und einer Vielzahl

von genKI-Tools. Diese Tools formieren sich – gesteuert durch die Nutzer:innen – zu einer Art persönlicher Assistenz, wie im Folgenden ausgeführt wird.

3 Forschungsfragen und -methode

Die Ausführungen in diesem Artikel fußen auf zwei Fokusgruppeninterviews mit Mitarbeitenden im Qualifizierungsprojekt NextGen an der Hochschule Mittweida. Bei der Entwicklung des Interviewleitfadens wurde von folgenden Forschungsfragen ausgegangen:

1. Wie verwenden Promovierende und Postdocs im Rahmen von NextGen genKI-Tools in Forschung, Lehre und Verwaltung?
2. Was ist das Potential von Peer-Learning, um die gezielte Anwendung von genKI-Tools zu erlernen? (Wie) kann es zur Überwindung von Herausforderungen beitragen bzw. die Wissenschaftler:innen weiter stärken?

Die erste Frage wurde deduktiv abgeleitet und soll bestehende Erhebungen zur KI-Nutzung an Hochschulen um die Perspektive einer fachlich breit aufgestellten und digitalisierungsorientierten Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAW) ergänzen. Die zweite Frage dient unter anderem der projektinternen Einschätzung dazu, wie geeignet bisherige Peer-Learning-Formate für den Erwerb von KI-Wissen sind und wie Promovierende und Postdocs gezielter unterstützt werden können. Die Dokumentation der Erkenntnisse soll jedoch auch anderen Einrichtungen bei der Entwicklung von Weiterbildungsformaten Orientierung bieten.

Als Erhebungsmethode wurde das Fokusgruppeninterview gewählt, um den Austausch über Nutzungstendenzen von genKI-Tools, ihre Potenziale und Grenzen sowie die Peer-Learning-Erfahrungen in einem Diskussionsformat zu ermöglichen. Dabei wurde leitfadengestützt nach dem Prinzip der Offenheit gearbeitet, um die induktive Entwicklung unerwarteter Hypothesen zu ermöglichen (Witzel, 2000). Es wurden zwei Interviews durchgeführt und aufgrund der Verhinderung zweier Teammitglieder eine weitere Person mit vergleichbaren Tätigkeiten aus dem NextGen Umfeld mit einbezogen, die ebenfalls an den KI-PGS teilgenommen hatte. So wurden insgesamt sieben Personen in zwei Fokusgruppen interviewt. In die Interviews flossen Aussagen in deutscher und englischer Sprache ein; die entsprechenden Zitate wurden für diesen Beitrag ins Deutsche übersetzt. Die Auswertung der Interviews erfolgte im Sinne einer inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2012) mit einem Zusammenspiel aus deduktiver und induktiver Kategorienbildung.

4 „KI ist meine Assistenz“ – Ergebnisse der Fokusgruppeninterviews

4.1 Flexible Einbindung generativer KI in individuelle Arbeitswelten

Die durchgeführte Erhebung befasste sich in einem ersten Schritt mit der Bestandsaufnahme des Umgangs mit genKI-Tools unter den NextGen-Mitgliedern, da die Aus-

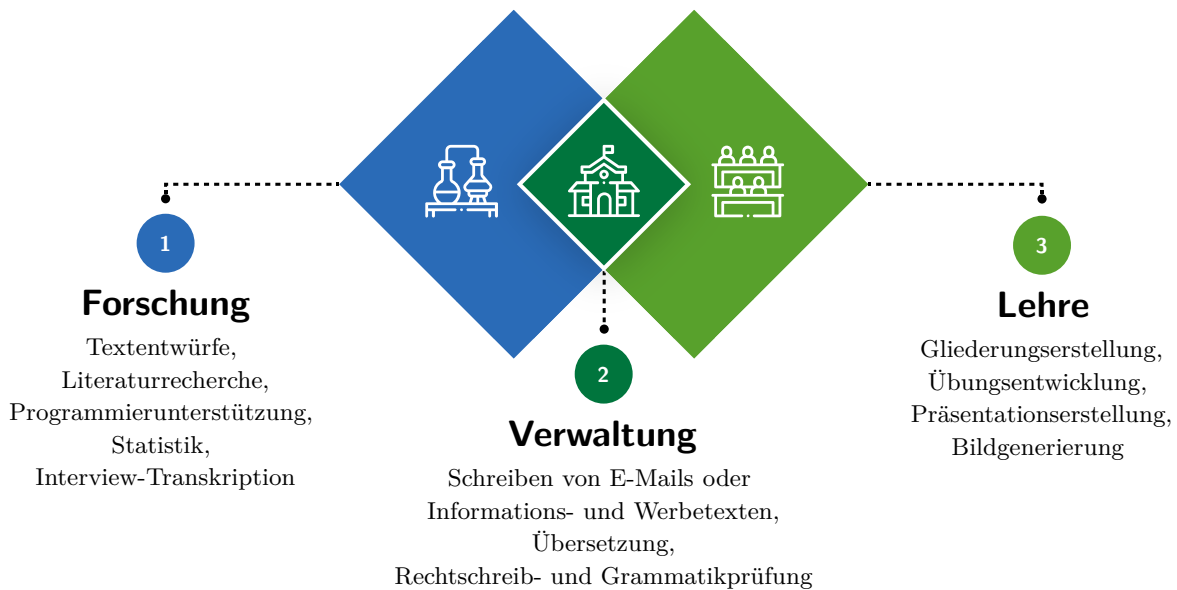


Abbildung 1: Anwendungsbeispiele für genKI-Tools in Forschung, Verwaltung und Lehre im Team von NextGen.

sagen dazu die Basis für die weitere Diskussion darstellten. Ein darauf aufbauendes Anliegen war es zu eruieren, welche Hemmnisse und Unterstützungsbedarfe im Umgang mit genKI-Tools unter den Teilnehmenden bestehen und wie NextGen sie auch zukünftig diesbezüglich fördern kann. Tatsächlich berichteten die Teilnehmenden bereits von einer kreativen, diversifizierten und stark auf die eigene Arbeitsweise zugeschnittenen Nutzungsweise von genKI-Tools. Sie waren größtenteils sehr versiert in der Nutzung verschiedener Werkzeuge, sowie in der Einschätzung ihrer jeweiligen Potenziale, Risiken und Grenzen. Lediglich eine Person gab an, KI-Werkzeuge nur äußerst selten zu benutzen. Mehrfach wurde das Bild eines Assistenten bzw. einer Assistentin verwendet, deren Rolle von einer jeweils individuell-fachspezifischen Kombination aus verschiedenen KI-Instrumenten übernommen werden könne. Hierbei zeigte sich in unserem Teilnehmendenkreis größtenteils eine ausgeprägte Aufgeschlossenheit gegenüber einer solchen eingegrenzten und kontextsensitiven Nutzung von KI in Forschung, Lehre und Verwaltungsaufgaben im Hochschulkontext. Die Frage, wie Studierenden genau diese Nutzungskompetenz im Rahmen der Hochschullehre vermittelt werden könne, trat besonders prominent als Herausforderung in Erscheinung. Die wichtige Rolle des sowohl informellen als auch formellen Peer-Learning wurde von den Teilnehmenden organisch hervorgehoben. Für alle Teilnehmenden war der Austausch mit Kolleg:innen ein Kanal für die Erweiterung ihrer Kenntnisse, wenn nicht sogar der ursprüngliche Berührungspunkt mit ChatGPT und verwandten Tools. Die Befragten nutzen eine Bandbreite von genKI-Tools bereits auf vielfältige, zielgerichtete und bedarfsorientierte Weise in ihren diversen wissenschaftlichen Aufgabenbereichen, die wir in der Befragung grob in „eigene Forschung“,

„Lehre“ und „Verwaltung“ unterteilten (siehe Abbildung 1). Insbesondere in der Forschung (1) wurde deutlich, wie disziplinenabhängig und individuell KI-gestützte Systeme zum Einsatz kommen. Für nahezu alle Teilnehmenden relevant war die Unterstützung durch KI für die Generierung erster Textentwürfe, die Entwicklung erster Gliederungen für Vorträge und schriftliche Arbeiten, die Literaturrecherche sowie auch für die Überprüfung von Calls for Papers auf thematische Anschlussmöglichkeiten. Je nach Disziplin wurden genKI-Tools außerdem genutzt zur Unterstützung beim Programmieren, bei der Anwendung von Statistikprogrammen wie z.B. SPSS, zur Transkription und Auswertung von Interviews, sowie zur Generierung von Beschreibungen einfacher Elektroschaltungen in der Elektrotechnik.

In der Verwaltung (2) erleichtern genKI-Tools u.a. das professionelle und zeitsparende Verfassen von E-Mails oder kreative Aufgaben wie das Erstellen von Informations- und Werbetexten. Weiterhin werden sie für das Übersetzen und für die Rechtschreib- und Grammatikprüfung verwendet. In der Lehre (3) wiederum dienen sie u.a. zur Entwicklung von Übungsformaten für Studierende und zur Erstellung ansprechender PowerPoint-Präsentationen inklusive Bild- und Grafikgenerierung.¹ Wie deutlich werden wird, leistet die KI in allen drei Feldern lediglich Vorarbeit; Ergebnisse werden durch die Wissenschaftler:innen überprüft und in weitere Arbeitsschritte eingebunden. Die Etablierung dieser aktuellen Verteilung der Rollen in Nutzer:in und Assistenz war jedoch mit einem Lernprozess verbunden.

4.2 Einordnung generativer KI als „Assistenz“

Charakteristisch für die Beschreibung der eigenen Nutzungsweise von genKI-Tools war die Einordnung der Ge-

¹ Folgende genKI-Tools wurden von den Befragten konkret benannt und verwendet: ChatGPT, DeepL Write, Elicit, Gemini,

Grammarly, Grok, Microsoft Copilot, Midjourney, noScribe, NotebookLM, Perplexity, Research Rabbit.

samtheit der Tools als persönliche Assistenz.² Diese wurde zunächst von einer Person erwähnt, die ihre recht optimistische Einstellung KI gegenüber betonte. Dieser Gedanke wurde vor allem im Laufe des ersten Fokusgruppeninterviews wiederholt aufgegriffen.

„Im Moment sehe ich KI auch nicht als Bedrohung an, überhaupt nicht, sondern wenn du das wirklich [mit Kompetenz benutzt], dann gibt es sogar solche Potenziale, dass es mein Assistent sein könnte.“

Was steckt hinter dieser Idee der „Assistenz“? Interessant ist zunächst, dass nicht ein bestimmtes genKI-Tool als persönliche Assistenz begriffen wird, sondern eine individuelle Konstellation verschiedener KI-Angebote. Die Interviewteilnehmenden waren, bis auf wenige Ausnahmen, versiert darin, verschiedene Werkzeuge sinnvoll zu kombinieren. So beschrieb eine Person ihren KI-unterstützten Schreibprozess folgendermaßen: „Ich persönlich nutze immer noch eine zweite oder dritte KI dazu. [...] [Zum] Inhalt generieren meistens das ChatGPT, dann mache ich eine Korrekturschleife, sag was da noch rein muss und dann fürs Feinschreiben nutze ich das DeepL Write, weil das für mich die angenehmeren Texte generiert.“

Die Assistenz wird in erster Linie zur Aufgabendelegation genutzt, insbesondere mit dem Ziel der Optimierung von Zeitressourcen. So beschreibt eine teilnehmende Person ihre ursprüngliche Veranlassung, ChatGPT auszuprobieren: „[Ein] Professor bat ein kleines Team von uns, in sehr kurzer Zeit einen Projektantrag zu schreiben. Und das war wirklich nicht machbar [...] und ich dachte, okay, schauen wir mal. Ich kann der Quelle [Anm.: ChatGPT] nicht trauen. Das ist das Problem. Ich denke das immer noch. Aber vielleicht ist es eine Hilfe. Und das war es wirklich.“ Die Teilnehmer:innen betonten, dass die Entscheidung, welche Aufgaben an ein genKI-Tool delegiert werden sollten, von verschiedenen Faktoren abhängig sei, wie etwa der Komplexität, Wichtigkeit und dem Routinecharakter der Aufgabe, sowie den intendierten Adressat:innen:

„Es kommt ja darauf an, was für einen Arbeitsaufwand habe ich und was ist die Zielperson oder die Zielgruppe. Es ist nicht jede Aufgabe gleich wertvoll, gleich wichtig. Und wenn ich eine Aufgabe niedriger Priorität habe, dann nutze ich das durchaus.“

Ein weiterer Aspekt der Verwendung von genKI-Tools als Assistenz ist deren Nutzung als Gesprächspartner:in in einem simulierten Austausch, z.B. zur iterativen Generierung von Fragestellungen und Gedankengängen oder zum Aneignen neuer Sachverhalte. So beschrieb eine Person, wie sie nicht nur nach und nach lernte mit der KI umzugehen, sondern gerade den manchmal herausfordernden Prozess des Promptings nutzte, um ihre eigenen Gedankengänge iterativ zu entwickeln:

„Manchmal ist es auch nützlich, Dinge zu fragen, selbst wenn ich keine fokussierte Antwort bekomme. Dann denke ich, [...] vielleicht war meine Frage auch nicht klar genug. Dann versuche ich es mit einer anderen Frage und durch das Stellen von Fragen lerne ich.“

Hier offenbart sich eine Art wechselseitige Beziehung mit genKI-Tools, in denen nicht nur Input in Output umgewandelt wird, sondern KI flexibel in verschiedene wissenschaftliche Schaffensprozesse eingebettet wird – diese aber keineswegs komplett übernimmt: „Am Anfang hatte ich kein gutes Ergebnis. Aber als ich die Frage besser fokussierte [...] hatte ich zumindest einen sehr guten Rahmen, in dem ich das belassen habe, was ich für richtig hielt. Und ich habe das entfernt, dem ich wirklich nicht trauen konnte oder bei dem ich mir nicht sicher war.“

Deutlich wird hier die Idee der Zusammenarbeit mit der KI, mit der nutzenden Person in einer kompetent anleitenden Rolle gegenüber der KI-Assistenz. Nur mit der nötigen Expertise, welche sowohl die eigene Fachexpertise, als auch Kenntnis der Grenzen der KI-Werkzeuge beinhaltet, können die richtigen Aufgaben an die KI delegiert und die entsprechenden Ergebnisse eingeschätzt und sinnvoll verwendet werden. KI als Assistenz bedeutet also auch, dass die Verantwortung für und die Kontrolle über das Arbeitsergebnis bei den Nutzer:innen verbleibt. So betonte eine teilnehmende Person mehrfach, dass nur solche Aufgaben an die KI übergeben werden sollten, welche man auch selbst in der Lage sei, zu überprüfen: „Ich weiß nicht, was da passiert. Und weil ich ja auch die Sicherheit haben möchte, was herauskommt, muss ich eben alles auch überprüfen und testen.“ Im Sinne dieser kontrollierten Nutzung waren sich die Teilnehmer:innen auch über die „Launen“ der genKI-Tools sehr bewusst und haben gelernt, diese einzuschätzen und mit ihnen zu arbeiten: „[...] also KI hat Launen. Nicht jeder Prompt funktioniert immer gleich gut. [...] Also man muss auch manchmal so ein bisschen anpassen und sagen, okay jetzt ist es gerade nicht so gut gelaufen und dann wieder neu anfangen oder eben auch wieder selber was machen.“

Deutlich wurde zudem, dass – analog zu einer menschlichen Assistenz – nicht alle Aufgaben an die KI delegiert werden (können). So zum Beispiel beschrieb eine Person, wie KI zwar im Schreibprozess unterstützen könne, der Einsatz (zumindest bei als subjektiv bedeutungsvoll bewerteten Arbeiten) jedoch minimal und rein unterstützend sein solle, um sicherzustellen, dass das Ergebnis auch den eigenen Intentionen entspricht:

„Was ich nicht machen kann, ist KI für mein Schreiben zu benutzen. Also wenn dann wirklich nur als Rahmen und als Vorgabe. [...] Also die haben irgendwo so diese Art und Weise [...], dass die sehr attraktiv schreiben [...]. Und dann liest du das ein zweites Mal und dann siehst du eigentlich, dass [...] das eigentlich nicht das ausdrückt, was

² Von den Teilnehmenden wurde sowohl die männliche („mein Assistent“) als auch die weibliche („meine Assistentin“) Formulierung verwendet. Im Sinne der Lesbarkeit wurde für diesen

Artikel die gender-neutrale Formulierung „meine Assistenz“ gewählt.

du willst. [...] dann lieber wirklich sagen, ich mach meine Autorschaft da draus und der unterstützt mich dann, indem er guckt, okay, hast du irgendwelche Satzzeichen oder sowas vergessen.“

Es wird deutlich, dass die Nutzung von genKI-Tools von den Teilnehmenden nicht als Ersatz, sondern als Ergänzung zu eigenen Kompetenzen verstanden wird – im Sinne einer flexibel einsetzbaren Assistenz, die in individuelle Arbeitsprozesse eingebettet wird. Dabei zeigt sich ein reflektierter Umgang, der von einem Bewusstsein für die Potenziale ebenso wie für die Grenzen der Technologie geprägt ist. Insbesondere wurde betont, dass genKI-Tools vor allem bei grundlegenden Aufgaben hilfreich seien, während komplexe, spezialisierte und inhaltlich anspruchsvolle Arbeiten weiterhin der wissenschaftlichen Expertise vorbehalten bleiben. Die Verantwortung für Inhalt und Qualität verbleibt bewusst bei den Nutzer:innen, die sich aktiv und kompetent in einer steuernden Rolle sehen.

4.3 Grenzen und Risiken generativer KI als Assistenz

Trotz dieser recht optimistischen Einschätzungen und der dargestellten flexiblen und kompetenten Nutzungsweise waren nicht alle Äußerungen zu genKI-Tools positiv. Neben den bereits erwähnten Schwächen, die von den Teilnehmenden bereits gut umschifft werden können, wurden schwerwiegendere unerwünschte Nebeneffekte der KI-Nutzung zur Sprache gebracht.

Entgegen der Sichtweise, dass genKI-Tools als Assistenz fungieren können, wurden Zweifel angebracht, ob KI-Nutzung wirklich zu einer Effizienzsteigerung führt. Stattdessen hat die Nutzung der Tools auch das Potenzial, Zeit zu verschwenden. Ein:e Teilnehmer:in betonte, dass gerade im Schreibprozess gut zwischen Eigenarbeit und der Nutzung von KI abgewogen werden müsse, um eine echte Zeitersparnis sicherzustellen: „[...] aber wenn man versucht mit KI jeden Satz dann irgendwo zu verbessern, wenn man denkt, dass KI aufgrund des Pools, auf den das zurückgreift, dann der bessere Autor wäre, dann verprasst man wahnsinnig viel Zeit und es wird nicht besser dadurch.“ Die Beobachtung, dass Zeitersparnis durch KI-Nutzung kein Automatismus ist, ist verschränkt mit einer Besorgnis, dass genau diese Erwartung zu einer verstärkten Arbeitsverdichtung führen könne bzw. bereits führt. Dies könne zu einem Verlust der oben beschriebenen Umsichtigkeit in der Nutzung von KI und damit verstärkt zu Qualitätsproblemen führen. Diesbezüglich kommentierte eine Person:

„[I]ch [würde] eigentlich darauf bestehen, dass man von uns nicht verlangt, KI zu benutzen. [...] Also man sollte [...] nicht verlangen, wir halsen dir jetzt noch drei oder vier Projekte auf, weil die könntest du ja mit KI machen quasi, weil dann gibt es dann irgendwann mal keine Überprüfung, [...] wenn man zu überfordert ist und dann einfach zu viel der KI überlässt.“

Zum Nutzungszwang von KI äußerte eine weitere Person, dass sie befürchte, dass dies „den Konkurrenzgedanken in

der Gesellschaft verschärfen“ könne: „[...] da müssen wir echt ein bisschen aufpassen, dass es am Ende nicht darauf hinausläuft, dass die Leute die Führungspositionen bekommen, die [sind], die KI am besten nutzen können.“ Diese Furcht, ohne extensive KI-Nutzung und -Expertise in einer schnelllebigsten Arbeitswelt nicht mehr bestehen zu können oder in diesem Zuge zumindest Fertigkeiten zu opfern, zeigt sich auch im folgenden Zitat:

„Im Moment sind wir noch nicht bedroht, aber was ist, wenn uns jemand mal sagt [...]: Du darfst für den E-Mail-Verkehr oder für einen Projektantrag nicht mehr als zwei Minuten aufwenden. Das muss jetzt alles automatisiert ablaufen. Ich finde das höchst gefährlich, weil in dem Moment habe ich ja gar keine Freiheit mehr [...], selber mir Gedanken zu machen. Da geht auch geistige Freiheit verloren.“

Schließlich waren auch umfassendere Sorgen um den Einfluss KI-generierter Inhalte auf die Gesellschaft als Ganzes Teil der Interviews. Neben Datenschutzbedenken war es auch die Intransparenz der Trainingsvorgänge der genKI-Tools und damit eine Unberechenbarkeit ihrer zukünftigen Entwicklung, die Sorgen auslösten. Bedenken wurden auch hinsichtlich Falschinformationen geäußert, vor allem in Bezug auf KI-gestützte Bild- und Videogenerierung: „Man kann, glaube ich, in Zukunft kaum noch wissen, was echt ist und was nicht.“

Trotz der überwiegend kompetenten und reflektierten Nutzungspraxis wird also deutlich, dass genKI-Tools auch mit kritischem Blick betrachtet werden. Die Interviews zeigen, dass neben Fragen der Effizienzsteigerung und Entlastung auch Sorgen über Qualitätsverluste, Nutzungszwang und gesellschaftliche Auswirkungen im Raum stehen. Damit erweitert sich das Bild der KI als Assistenz um eine wichtige Perspektive: Nur unter freiwilliger, kontrollierter und bewusster Einbettung kann ihr Einsatz tatsächlich unterstützend wirken.

4.4 Umgang mit KI-Nutzung unter Studierenden – Schwierigkeiten in der Vermittlung einer Vorstellung von KI als Assistenz

Ein besonders gewichtiger Punkt kritischer Reflexion war der Umgang mit der Nutzung von genKI-Tools unter Studierenden. Es ist gerade diese Rolle der KI als Assistenz, deren Vermittlung in der Lehre die Interviewten vor Herausforderungen stellte und Fragen aufwarf – denn vielfach wurde eine Nutzungsweise bei Studierenden wahrgenommen, die eine zu starke Abhängigkeit von genKI-Tools vermuten ließ.

Diese Darstellung bildet zwangsläufig nur die subjektive Perspektive der Lehrenden ab – es wurden keine separaten Daten zur Nutzung von genKI-Tools durch die Studierenden erhoben. Insofern handelt es sich nicht um eine Repräsentation des tatsächlichen Umgangs der Studierenden mit KI, sondern um persönliche Erfahrungswerte, Sorgen und Ängste der Interviewten. Nichtsdestotrotz offenbaren diese ein für die Teilnehmenden alltagsnahes Spannungsfeld mit Problemen, für die es dringend eine bessere Handhabung benötigt.

Es besteht erstens die Sorge, dass Studierende KI-generierte Inhalte ohne Reflexion und Überprüfung übernehmen können. Im Zusammenhang damit wurde ein wahrgenommener Verlust inhaltlicher Tiefe und Dichte, Korrektheit sowie auch Vertrautheit mit den eigenen Arbeitsergebnissen unter Studierenden beklagt. Die Interviewten berichteten von einzelnen Fällen, in denen Studierende nicht zufriedenstellend in der Lage waren, eine mutmaßlich von einer LLM generierte Abschlussarbeit angemessen zu verteidigen, da sie mit deren Inhalt kaum vertraut waren: „[...] wenn sie [die Verteidigung] ihrer Masterarbeit vorbereiten müssen, dann müssen sie wissen, was sie geschrieben haben. Und wenn sie nicht genau wissen, was sie geschrieben haben, weil ChatGPT das alles geschrieben hat, dann ist das wirklich schade und tut mir leid für die Studenten.“

Zweitens wurde die Befürchtung deutlich, dass das für eine Überprüfung benötigte Grundlagenwissen aufseiten der Studierenden schon jetzt gerade durch die Verfügbarkeit von KI nicht mehr in ausreichendem Maße erworben würde und abrufbar sei. Aus Sicht der Interviewten wird nur über ein Vermitteln von Grundlagenwissen, welches ohne die Anwendung von KI von den Studierenden abgerufen werden kann, die Verwendung von KI als Assistenz möglich:

„[W]enn wir KI überprüfen wollen und ich denke, das ist der Konsens hier in der Runde, dann müssen wir Grundlagenwissen haben. Ohne Wissen können wir keine KI überprüfen und wenn wir uns nicht von der KI abhängig machen wollen, müssen dort aus meiner Sicht auch im Studium viele Dinge ohne KI geschehen, um dort ein Grundlagenwissen aufzubauen. Und wenn ich dieses Grundlagenwissen habe, erst dann kann ich KI wirklich einsetzen.“

Es ist das zuvor beschriebene Verständnis von generativen genKI-Tools als Assistenz, einhergehend mit einer spezifisch gerahmten Nutzungspraxis und definiertem Rollenverständnis, das den Studierenden aus Sicht der Lehrenden erst noch vermittelt werden muss. Eine Person äußerte hier den Bedarf, den Studierenden „einen Umgang mit der goldenen Mitte bei[zu]bringen“ – hier konzipiert als ein Mittelweg aus eigener Anstrengung und der Verwendung von KI. Nicht nur konkrete Fertigkeiten und ein entsprechendes Einschätzungsvermögen, sondern auch ein gewisses Selbstbild der KI als Assistenz gegenüber, sollten hier vermittelt werden: „[I]ch finde auch in den Inhalten für die Lehre soll definitiv rein, das Selbstbewusstsein der Leute zu stärken. Nehmt KI als Assistenten, aber seid immer noch so selbstbewusst, [...] dass ihr euch trotzdem nicht selber ersetzen lasst, weil [...] man dadurch [...] Gefahr läuft, die eigenen Fähigkeiten, dass man die schwächt.“

Wie genau die Vermittlung dieser Fertigkeiten und Positionierungen aussehen könnte, das heißt wie Studierende zu einem Verständnis von KI als Assistenz geleitet werden könnten, ist noch mit Unsicherheiten und offenen Fragen verbunden. Trotz des starken Problemcharakters dieser Fragestellungen ist oft noch unklar, an welcher Stelle und in welchem Umfang welche Akteur:innen die Bildung zum

Thema KI übernehmen sollten. Eine teilnehmende Person sprach sich für Fallbeispiele aus, die Studierenden die Konsequenzen einer unreflektierten Nutzung von genKI-Tools vor Augen führen könnten: „also wirklich Use Cases, die bei den Studenten aufzeigen könnten, wenn ihr das nicht überprüft, dann kann euch sowas passieren.“ Einigkeit bestand über den Bedarf an „lehrreichen Momenten“, in denen Studierende die Grenzen der KI selbst erkennen können.

Vor diesem Hintergrund kommt den Lehrenden eine zentrale Rolle zu. Ihre eigene Kompetenz im Umgang mit genKI-Tools ist entscheidend, um Studierenden ein differenziertes Verständnis von KI in der wissenschaftlichen Arbeit zu vermitteln. Reflektierte Lehrpersonen können durch gezielte Fragen, transparente Bewertungskriterien und didaktische Entscheidungen aufzeigen, wie KI sinnvoll unterstützend eingesetzt werden kann – ohne dass eigenständiges Denken, Fachwissen oder Urteilsfähigkeit verloren gehen. Wie ein:e Teilnehmender:in treffend formulierte, ermöglicht die eigene Fachkompetenz als Lehrperson, KI-basierte Leistungen zu erkennen und in ihrer Tiefe kritisch zu hinterfragen – nicht um diese pauschal abzulehnen, sondern um sie einordnen und gegebenenfalls anerkennen zu können:

„Wenn ich zum Beispiel eine wunderbare Präsentation zu einem Thema bekomme [...], kann ich leicht erkennen, dass sie vielleicht mit KI erstellt wurde. Aber dann kommt meine Nachfrage. Und mit der Frage ist es sehr einfach zu beurteilen, wie sehr die Studis zumindest verstehen, was sie in ihrer Präsentation haben. Für uns [als Lehrende] ist das einfach, weil wir kompetent sind. Ich glaube, einer meiner Studis hat wirklich mit künstlicher Intelligenz gearbeitet, aber er konnte alles begründen. Und dann, ok, warum nicht? Er hat das Werkzeug auf eine sehr gute Weise genutzt.“

Die Vermittlung von KI-Kompetenz in der Hochschullehre ist also von einem grundlegenden Spannungsfeld geprägt: Einerseits gilt es, insbesondere in den frühen Studienphasen ein solides, KI-unabhängiges Grundlagenwissen aufzubauen. Andererseits wächst der Druck, KI-Kompetenzen zu vermitteln, um Studierenden im Berufsleben wettbewerbsfähig zu halten. Daraus ergibt sich die komplexe Frage, wie viel KI-Nutzung in welcher Studienphase pädagogisch sinnvoll ist. Gefordert ist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen technologischer Befähigung und eigenständiger Kompetenzentwicklung.

4.5 Peer-Learning als Weg zu mehr KI-Kompetenz

Trotz Unterschieden im Ausmaß und der Art der KI-Nutzung waren sich die Interviewteilnehmenden einig, dass Peer-Learning – insbesondere die im Rahmen von NextGen praktizierten Formate – maßgeblich zum individuellen Kenntnisstand zu genKI-Tools beigetragen hat. Daneben informierten sich die Teilnehmenden auch über formelle Weiterbildungsangebote innerhalb und außerhalb der Hochschule, im Austausch mit privaten Kontakten oder über Podcasts und Social Media. Der Austausch mit

Kolleg:innen wurde jedoch als zentral für die Entwicklung einer kompetenten Nutzung beschrieben. Informelle Gespräche im Team oder in anderen Arbeitskontexten erwiesen sich besonders für Empfehlungen und erste Anwendungsschritte als hilfreich. Das formelle Peer-Learning-Format der Peer-Group-Session (PGS) spielte darüber hinaus eine besondere Rolle beim Aufbau von Vertrautheit im Umgang mit genKI-Tools – und letztlich bei der Entwicklung eines Konzepts von KI als Assistenz.

Das PGS-Format ist seit Projektbeginn fester Bestandteil des NextGen-Qualifikationsprogramms; im Frühjahr 2025 wurde mit der KI-PGS eine neue Schwerpunktsetzung eingeführt. In das erste Fokusgruppeninterview floss eine Session zur KI-gestützten PowerPoint-Erstellung ein, in das zweite zusätzlich eine PGS zu KI-gestützter Literaturarbeit. Positiv hervorgehoben wurde, dass die Sessions konkret auf spezifische Tools eingingen, statt bei allgemeinen Diskussionen zu verbleiben. Auch das Erleben der aktuellen Grenzen der Tools wurde als wertvoll beschrieben. Genannt wurde unter anderem der Zeitgewinn gegenüber eigenständigem Ausprobieren, da das Format eine Vorauswahl bietet und strukturiertes Testen unter Anleitung erlaubt. Dies erleichtert die Entscheidung, ob sich ein Tool für eine Aufgabe eignet oder nicht: „Und bei diesen Powerpoint-Erstellungen, muss ich ehrlich sagen, für mich war das alles unbefriedigend, was da vorgestellt wurde. Und letztendlich muss ich es doch selber machen. Aber es ist ja trotzdem gut, wenn man auch weiß, was ich sein lassen kann, was ich nicht austesten muss.“

Ein Erleben auch unbefriedigender Ergebnisse im gemeinschaftlichen Kontext der PGS unterstützte die Teilnehmenden darüber hinaus bei der Einordnung der eigenen Fähigkeiten im Umgang mit KI, wie zum Beispiel des Promptings, und konnte so Unsicherheiten entgegenwirken:

„Wenn ich da jetzt alleine dran sitzen würde, hätte ich ja quasi nur dieses eine Ergebnis [...] und ich wüsste nicht, ist das jetzt immer so oder liegt das jetzt an mir, dass ich es falsch formuliert habe oder so. [...] Von daher finde ich das Format auf jeden Fall voll gut.“

Und schließlich hilft das Format den Teilnehmenden dabei, in der sich rasant entwickelnden Landschaft technischer Unterstützungsmöglichkeiten den Überblick zu behalten und auf dem neuesten Stand zu bleiben: „[...] das Hauptlearning war, dass ich es aktuell noch nicht nutzen kann, für eine PowerPoint so von der Pike auf entwerfen zu lassen. Aber ich glaube, mein Learning war auch, dass ich glaube, dass das kommen wird. Also das ist ja jetzt schon viel besser als vor einem Jahr und ich glaube, man muss da ein bisschen dranbleiben und immer mal wieder checken, wie gut die aktuell sind.“

5 Diskussion

5.1 KI als Assistenz für erfahrene Anwender:innen

Deutlich wird aus den Interviews, dass die Teilnehmenden in Bezug auf genKI-Tools größtenteils zu einer Anwender:innengruppe gehören, der es gelungen ist, bereits ei-

gene kreative, eigenverantwortliche und kompetente Anwendungsmuster zu entwickeln, und die Potenziale und Grenzen von KI kritisch zu reflektieren. Sie verwenden individuelle Konstellationen mehrerer genKI-Tools als „Assistenz“ zur Aufgabendelegation und zur Optimierung von Zeitressourcen, haben erprobt, für welche Aufgaben sie geeignet sind und für welche nicht, nutzen sie für einen simulierten iterativen Austausch, und sind sich der Bedeutung ihrer eigenen Fachexpertise für die kontrollierte und konstruktive Nutzung von KI bewusst. Sie überprüfen die KI-generierten oder durch KI unterstützten Arbeitsergebnisse kritisch und wissen, wie anhand effektiven Promptings und iterativer Schleifen mit den „Launen“ der genKI-Tools umzugehen ist. Diese Beobachtungen spiegeln den aktuellen Diskurs um eine möglichst weitsichtige Anwendung von KI wider, in dem bspw. die „Herausforderung der dualen Expertise“ (*engl. dual expertise challenge*) thematisiert wird – nämlich die Erkenntnis, dass für ein optimales und verlässliches Ergebnis der Arbeit mit KI Fachexpertise sowie Expertise im Umgang mit KI vorhanden sein muss, dies aber unter Umständen auch mehr und nicht etwa weniger kognitiven Aufwand mit sich bringt. Demgegenüber findet sich das „Dilemma der Noviz:innen“, in diesem Kontext die Studierenden, die sich beides erst noch aneignen müssen und bis dahin nur eingeschränkt die Kompetenz besitzen, KI-unterstützte Arbeitsergebnisse richtig einzuschätzen (Mishra, 2025). Auch im Hinblick auf kognitive und neuronale Aspekte scheint es angesichts neuerer Studienergebnisse sinnvoll zu sein, sich in erster Linie auf die eigenen menschlichen und fachlichen Kompetenzen zu stützen und KI, wie in diesem Artikel herausgearbeitet, lediglich als zuarbeitende Assistenz zu verwenden (Kosmyna et al., 2025; vgl. Lee et al., 2025).

5.2 GenKI zwischen Effizienzgewinn und pädagogischer Herausforderung

Eine offene Frage bleibt, wie das beschriebene Verhältnis – Nutzer:in als Expert:in und KI als Assistenz – Studierenden vermittelt werden kann. Angesichts der allgegenwärtigen und leicht zugänglichen generativen KI ist der Bildungsweg vieler Wissenschaftler:innen – bei denen zuerst Fachkompetenz, und dann KI-Kompetenz entwickelt werden konnte – nicht auf die jüngere Generation übertragbar. Beides muss nun parallel vermittelt werden, was angesichts begrenzter Ressourcen in der Hochschullehre schwer umsetzbar ist. Gleichzeitig wird eine übermäßige Nutzung und ein unkritisches Vertrauen in KI beklagt, verbunden mit Sorgen um den Verlust zentraler Kompetenzen – trotz des Bewusstseins, dass Studierende ohne KI-Nutzung im Berufsleben benachteiligt sein könnten. Aus Sicht der Interviewten stellt der KI-Einsatz durch Studierende in der Hochschullehre ein komplexes Spannungsfeld und eine zentrale pädagogische Herausforderung dar, die bislang lediglich von ersten Ansätzen und offenen Fragen geprägt sind.

Ambivalent zu reflektieren ist außerdem der Grund, aus dem sich die Teilnehmenden überwiegend dazu gedrängt sahen, genKI-Tools anzuwenden. Sie sahen einen klaren Bedarf in der Reduktion ihrer Aufgabenlast und betrachteten KI als potenzielle Entlastung. Dabei verfügt gerade das NextGen Team über vergleichsweise umfangreiche

Ressourcen. Noch gravierender ist diese Einschätzung vor dem Hintergrund der strukturellen Rahmenbedingungen an HAW im Allgemeinen und insbesondere an der HSMW einzuordnen: Hier ist der Mittelbau „schlank“ aufgestellt, d.h. im Verhältnis zur Studierendenzahl, genauso wie das Gesamtbudget, verhältnismäßig klein. Unterstützung durch Kolleg:innen auf gleicher Karrierestufe oder durch studentische Hilfskräfte ist häufig eingeschränkt oder fehlt ganz. Die Lehrverpflichtung ist hoch, der fachliche Austausch im Team nur begrenzt möglich, während zugleich eine außergewöhnlich hohe Aufgabendiversität und eigenständiges Arbeiten den Alltag prägen. In diesem Kontext erscheint die Nutzung von genKI-Tools als flexibel einsetzbare Assistenzlösung zur Reduktion von Überlastung und zur Steigerung der Effizienz besonders attraktiv. In den Interviews wurde jedoch deutlich, dass dies ein hohes Maß an sowohl fachlicher als auch KI-bezogener Expertise voraussetzt – andernfalls drohen qualitative Einbußen oder zusätzlicher Zeitaufwand. Kritisch angemerkt wurde außerdem, dass die (zumindest angenommene) Effizienzsteigerung durch KI auch zu verstärkter Arbeitsverdichtung führen könne.

5.3 KI-Weiterbildung in Peer Group Sessions

Frühere Erhebungen zu den verschiedenen Peer-Learning-Formaten im Projekt NextGen (Kusche et al., 2024; 2025) bewerteten die Peer Group Sessions (PGS) bereits überwiegend als wertvollen Bestandteil der Qualifizierungsmaßnahmen. Das Feedback war jedoch teils ambivalent, insbesondere im Hinblick auf die Herausforderungen der heterogenen Teamzusammensetzung trotz gemeinsamer Zielsetzungen. In den aktuellen Fokusgruppeninterviews wurden die KI-fokussierten PGS hingegen durchweg positiv bewertet und der Wunsch nach Fortführung geäußert. Es zeigt sich, dass die in früheren Veröffentlichungen identifizierten drei zentralen Mehrwerte von Peer-Learning – das Kennenlernen unterschiedliche Perspektiven und kritische Reflexion der eigenen Arbeitspraxis, das Erlernen neuer Herangehensweisen sowie die Bereitstellung eines Raums zum Ausprobieren und zum Austausch direkten Feedbacks – auch von den KI-PGS umfassend erfüllt werden. Gerade angesichts der dynamischen Entwicklungen im Bereich generativer KI bieten sie durch das Prinzip der Arbeitsteilung die Chance, Wissenschaftler:innen beim Anschluss an technologische Entwicklungen zu unterstützen.

6 Limitationen

Limitierend ist zu erwähnen, dass lediglich sieben Personen in zwei Fokusgruppeninterviews befragt wurden. Insofern ist die Erhebung als erkundend und nicht erschöpfend zu betrachten. Zwar deckten unsere Interviewteilnehmenden eine gewisse Bandbreite an Fachbereichen ab, doch stellten sie durch ihre Zugehörigkeit zu NextGen eine spezielle und in dieser Hinsicht homogene Personengruppe dar, die in besonderem Maße Zugang zu Weiterbildungen hat, auch wenn diese in der Vergangenheit bis auf die erwähnten KI-PGS nicht KI-spezifisch waren. Schließlich wurde die Befragung und Auswertung vom NextGen-Management durchgeführt und nicht von einer unbeteiligten Person, was zu Antwortverhalten im Sinne einer sozialen Erwünschtheit geführt haben könnte.

Darüber hinaus ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Hochschulkontexte nur eingeschränkt möglich. Die Teilnehmenden arbeiten an einer Hochschule mit strategischer Ausrichtung auf Digitalisierung und KI, sodass ein überdurchschnittliches Maß an Offenheit, Erfahrung und Ressourcen im Umgang mit genKI-Tools zu erwarten ist. In weniger technikorientierten oder ressourcenärmeren Umgebungen könnten sich gänzlich andere Nutzungsmuster, Hemmnisse oder Kompetenzanforderungen zeigen. Auch die im Beitrag diskutierten hochschuldidaktischen Konsequenzen basieren ausschließlich auf den subjektiven Wahrnehmungen der Lehrenden; die tatsächlichen Kompetenzen, Praktiken oder Herausforderungen der Studierenden wurden nicht empirisch erhoben und können daher nur als angenommener Bezugsrahmen dienen.

Schließlich spiegelt die Erhebung eine Momentaufnahme in einem hochdynamischen Technologiefeld wider. Da sich Einsatzmöglichkeiten, Verfügbarkeiten und Kompetenzanforderungen generativer KI kontinuierlich verändern, sind die Befunde zeitgebunden und bedürfen regelmäßiger Aktualisierung.

7 Fazit & Ausblick

Das Qualifizierungsprogramm NextGen an der Hochschule Mittweida fördert Wissenschaftler:innen verschiedener Disziplinen und Karrierestufen auf dem Weg zur Berufungsfähigkeit. Zentral ist dabei das Peer-Learning-Format der Peer Group Sessions, bei welchem ein oder mehrere Teammitglieder berufsrelevante Themen für ihre Kolleg:innen aufbereiten und präsentieren. Weiteres Merkmal des NextGen-Kontexts ist seine Verortung an der Hochschule Mittweida, einer stark auf Digitalisierung und KI-Expertise ausgerichteten Hochschule. Vor diesem Hintergrund wurde in zwei Fokusgruppeninterviews erhoben, wie die NextGen-Teammitglieder aktuell generative KI-Werkzeuge in ihre Arbeit einbinden und welches Potenzial KI-spezifische PGS für eine entsprechende Weiterbildung bieten.

Die Analyse zeigt, dass sich unter den Interviewteilnehmenden ein Verständnis von generativer KI als individuell konfigurierbare Assistenz etabliert hat, bei dem die Verantwortung und Steuerung bewusst bei den menschlichen Nutzer:innen verbleiben. Dieses Verständnis betont die Notwendigkeit, genKI-Tools nicht als autonome Problemlösung, sondern als ergänzende Werkzeuge innerhalb eines disziplinär fundierten, kritisch reflektierten Arbeitsprozesses zu begreifen. Die Kompetenz, zwischen hilfreicher Unterstützung und potenziellem Qualitätsverlust zu differenzieren, setzt sowohl fachliches Grundlagenwissen als auch KI-bezogene Urteilskraft voraus. Die Vermittlung dieses Assistenzverständnisses an Studierende stellt angesichts der rasanten technologischen Entwicklungen, der direkten Verfügbarkeit von genKI-Tools und eines zunehmenden Nutzungsdrucks eine zentrale Herausforderung für die Hochschullehre dar. Für die Wissenschaftler:innen wird die Herausforderung der kontinuierlichen Weiterbildung bereits erfolgreich durch Peer-Learning adressiert, wie die Befragung zeigen konnte. Das Format der KI-PGS soll daher als fester Bestandteil des NextGen Weiterbildungsangebots etabliert und über die Projektlaufzeit weitergeführt werden.

Für die Hochschullehre erscheint es sinnvoll, KI-Kompetenzen nicht isoliert, sondern eingebettet in fachliche Lehr-Lern-Prozesse zu vermitteln. Besonders wirksam könnten Formate sein, die Studierenden „lehrreiche Momente“ ermöglichen, etwa durch Aufgabenstellungen, in denen die Grenzen oder Fehlannahmen generativer Modelle sichtbar werden und Reflexion angestoßen wird. Die Etablierung von niedrigschwelligen Austauschformaten wie themenspezifischen Werkstattangeboten, kollegialen Lernräumen oder interdisziplinären KI-Sprechstunden kann Lehrende wie Studierende dabei unterstützen, KI kompetent, kritisch und handlungsorientiert einzusetzen. Vergleichsstudien mit weniger KI-affinen Hochschulen könnten zeigen, inwieweit die beschriebenen Muster verallgemeinerbar sind. Längsschnittdesigns wären hilfreich, um zu untersuchen, wie sich das Assistenzverständnis über die Zeit entwickelt und welche Rolle institutionelle Unterstützungsangebote dabei spielen.

Für die Zukunft stellt sich somit nicht nur die Frage, wie die Erfahrungen mit diesem Format für eine Nachwuchsförderung nutzbar gemacht werden können, die womöglich nicht mehr, wie aktuell bei NextGen, durch spezifische projektgebundene Förderung unterfüttert sein wird. Vielmehr geht es darum, Strukturen zu etablieren, die es Wissenschaftler:innen wie Studierenden ermöglichen, KI-Kompetenz kontinuierlich aufzubauen, kritisch zu reflektieren und verantwortungsvoll in ihren jeweiligen Kontexten einzusetzen. Die Entwicklung einer projektunabhängigen Verankerung von KI-PGS oder ähnlichen Werkstattformaten sowie allgemeinen Nachwuchsförderungsangeboten an der Hochschule ist daher ein zentrales Anliegen der verbleibenden NextGen-Projektlaufzeit und darüber hinaus eine strategische Aufgabe für Hochschulen im Allgemeinen.

Literaturverzeichnis

- Aumüller, U., Behrens, M., Kavanagh, C., Przytarski, D. & Weßels, D. (2024). Mit generativen KI-Systemen auf dem Weg zum Human-AI Hybrid in Forschung und Lehre. In G. Schreiber & L. Ohly (Hrsg.), *KI:Text. Diskurse über KI-Textgeneratoren* (S. 47–66). De Gruyter.
- Bartels, M., Freise, F., Hartel, F. & Preiß, J. (2024). *ChatGPT & me 2.0. Eine Bestandsaufnahme im zweiten Jahr mit generativer KI an der Uni Hamburg*. Universität Hamburg. <https://doi.org/10.25592/uuhfdm.15966>
- Buck, I., Jost, C., Kreis-Hoyer, P. & Limburg, A. (2023). *KI-induzierte Transformation an Hochschulen. Diskussionspapier Nr. 26* (Hochschulforum Digitalisierung, Hrsg.). Hochschule RheinMain.
- Budde, J., Tobor, J. & Friedrich J. (2024). *Künstliche Intelligenz. Wo stehen die deutschen Hochschulen?* Berlin: Hochschulforum Digitalisierung. Verfügbar unter: https://hochschulforumdigitalisierung.de/wp-content/uploads/2024/06/hfd_blickpunkt_ki_monitor.pdf
- Garrel, J. von & Mayer, J. (2023). Artificial Intelligence in studies—use of ChatGPT and AI-based tools among students in Germany. *Humanities and Social Sciences Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02304-7>
- Garrel, J. von & Mayer, J. (2025). Künstliche Intelligenz im Studium. Eine quantitative Längsschnittstudie zur Nutzung KI-basierter Tools durch Studierende (2023 & 2025). Darmstadt. https://doi.org/10.48444/h_docs-pub-533
- Graßl, M., Schützeneder, J. & Meier, K. (2022). Künstliche Intelligenz als Assistenz: Bestandsaufnahme zu KI im Journalismus aus Sicht von Wissenschaft und Praxis. *Zeitschrift für Journalismusforschung*, (5), 3–27. <https://doi.org/10.1453/2569-152X-12022-12021-de>
- Hochschule Mittweida. (2022). KI-Strategie der Hochschule Mittweida. Ziele, Schwerpunkte und Handlungsfelder (Hochschule Mittweida, Hrsg.). Mittweida.
- Kosmyna, N., Hauptmann, E., Yuan, Y. T., Situ, J., Liao, X.-H., Beresnitzky, A. V. et al. (2025). Your Brain on ChatGPT: Accumulation of Cognitive Debt when Using an AI Assistant for Essay Writing Task. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.08872>
- Kreider, I., Kreuder-Schock, M., Lorenz, S. & Schley, T. (2023). Inklusion und Digitalisierung – Zwischen Chancen und Herausforderungen digitaler Teilhabe von Menschen mit Behinderung. In K. Kögler, H.-H. Kremer, V. Herkner & U. Weyland (Hrsg.), *Jahrbuch der berufs- und wirtschaftspädagogischen Forschung 2023* (S. 75–88). Opladen: Verlag Barbara Budrich.
- Kuckartz, U. (2012). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Beltz Juventa.
- Kusche, R., Strangfeld, K. & Freche, A. (2025). Erprobung von Tandem Peer-Group-Sessions als Qualifizierungsinstrument zur Erlangung der Berufungsfähigkeit. *NextGen Scientific Review*, (3), 34–43. <https://doi.org/10.48446/opus-15903>
- Kusche, R., Strangfeld, K., Freche, A. & Fuß, A. (2023). Auswirkungen von Peer-Learning auf die Berufungsfähigkeit im Qualifikationsprogramm NextGen: Konzeptionelle Überlegungen und Forschungsdesign. *NextGen Scientific Review*, (1), 73–80. <https://doi.org/10.48446/opus-13728>
- Kusche, R., Strangfeld, K., Freche, A. & Fuß, A. (2024). Peer-Learning als Qualifizierungsinstrument auf dem Weg zur Berufungsfähigkeit: Auswertung der Begleitstudien im Projekt NextGen. *NextGen Scientific Review*, (2), 69–77. <https://doi.org/10.48446/opus-14967>
- Lee, H.-P., Sarkar, A., Tankelevitch, L., Drosos, I., Rintel, S., Banks, R. et al. (2025). The Impact of Generative AI on Critical Thinking: Self-Reported Reductions in Cognitive Effort and Confidence Effects From a Survey of Knowledge Workers. *CHI '25*.

Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1–22.
<https://doi.org/10.1145/3706598.3713778>

Lensing, K. (2016). KI-basierte Assistenzsysteme für die Industrie 4.0. In B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl & M. ten Hompel (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0* (S. 1–29). Berlin, Heidelberg: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-45537-1_163-1

Mishra, P. (2025). *The GenAI and Expertise Paradox: Why It Makes Expert Work More Important But Harder*. Verfügbar unter: <https://punya-mishra.com/2025/02/13/the-genai-and-expertise-paradox-why-it-makes-expert-work-more-important-but-harder/>

Preiß, J., Bartels, M., Niemann-Lenz, J., Pawlowski, J. & Schnapp, K.-U. (2023). ChatGPT and me. Erste Ergebnisse der quantitativen Auswertung einer Umfrage über die Lebensrealität mit generativer KI an der Universität Hamburg. Universität Hamburg.

Salden, P., Leschke, J. & Persike, M. (2024). Das Projekt KI:edu.nrw – Rückblick für einen Ausblick. In P. Salden & J. Leschke (Hrsg.), *Learning Analytics und Künstliche Intelligenz in Studium und Lehre* (S. 3–24). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Soltyska, A., Berk, S. & Reich, A. (2024). Zur Rolle von KI-Anwendungen im Lernen und Lehren von Fremdsprachen im Hochschulkontext: Eine erste Bestandsaufnahme sowie Entwicklungsmöglichkeiten aus der Sicht eines universitären Sprachenzentrums. In P. Salden & J. Leschke (Hrsg.), *Learning Analytics und Künstliche Intelligenz in Studium und Lehre* (S. 265–286). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Tobor, J. (2024). *Blickpunkt: Leitlinien zum Umgang mit generativer KI* (Version 1.0) (Hochschulforum Digitalisierung, Hrsg.). Berlin.

Witzel, A. (2000). Das problemzentrierte Interview. *Forum Qualitative Sozialforschung*, 1(1). Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0114-fqs0001228>

Technische Lösungen für akademische Integrität: Potenziale und Grenzen des Safe Exam Browsers

Sicherung fairer Prüfungsbedingungen durch Open-Source-Software

Bilyal Khassenov, Ramona Kusche

Kontakt: Bilyal Khassenov, Hochschule Mittweida, khasseno@hs-mittweida.de

Zusammenfassung

Der Beitrag untersucht die Rolle technischer Lösungen zur Sicherstellung akademischer Integrität in digitalen Prüfungsumgebungen, insbesondere angesichts wachsender Risiken durch den Missbrauch KI-basierter Anwendungen wie ChatGPT, mit einem Fokus auf den Safe Exam Browser. Ziel ist es, die Wirksamkeit des Safe Exam Browsers bei der Verhinderung von Täuschungsversuchen und der Förderung fairer Prüfungsbedingungen zu bewerten sowie dessen Grenzen und mögliche Lösungsansätze kritisch zu beleuchten. Dabei werden die Funktionen, Vorteile und Einsatzmöglichkeiten des Safe Exam Browsers analysiert und technische, ethische sowie pädagogische Herausforderungen reflektiert. Die Untersuchung berücksichtigt technische Merkmale, Anwendungsszenarien und empirische Erkenntnisse zu Täuschungsverhalten. Der Beitrag zeigt, dass der Safe Exam Browser durch seinen Kiosk-Modus, seine Kosteneffizienz und Datenschutzkonformität eine effektive Lösung für digitale Prüfungen darstellt, indem er den Zugriff auf externe Ressourcen wie Suchmaschinen und KI-Chatbots einschränkt. Dennoch können Täuschungsversuche nicht vollständig ausgeschlossen werden, und technische Maßnahmen allein reichen nicht aus, um eine umfassende Kultur der Integrität zu etablieren. Durch transparente Kommunikation, Simulationen und pädagogische Ansätze können diese Grenzen überwunden werden, um die Qualität und Glaubwürdigkeit digitaler Bildungsprozesse langfristig zu sichern.

Keywords: academic integrity, artificial intelligence, safe exam browser.

1 Einführung

Akademische Integrität umfasst die konsequente Einhaltung ethischer und professioneller Prinzipien, Standards, Praktiken sowie eines kohärenten Wertesystems, das als Orientierungsrahmen für Entscheidungen und Handlungen in Bildung, Forschung und Wissenschaft dient, wie vom Europäischen Netzwerk für akademische Integrität definiert (Tauginiené, et al., 2023). Insbesondere in digitalen Lernumgebungen geraten diese Werte zunehmend unter Druck. Der unkomplizierte Zugang zu Online-Ressourcen und künstlicher Intelligenz (KI) erhöht das Risiko für Verstöße wie Plagiate, unerlaubte Zusammenarbeit oder die unzulässige Nutzung KI-generierter Inhalte, die nicht immer leicht nachweisbar sind (Theisen, 2023).

In diesem Zusammenhang gewinnen technische Lösungen zunehmend an Relevanz, die nicht nur Verstöße gegen akademische Integrität verhindern, sondern auch passiv

eine Kultur der Integrität fördern, indem sie Studierende darin unterstützen, ethisch verantwortungsvoll zu handeln (Nalyvaiko, Zhernovnykova, Nalyvaiko, & Molotok, 2022). Ein herausragendes Beispiel hierfür ist der Safe Exam Browser, der durch seine Sperrfunktionen und nahtlose Integration in Lernmanagementsysteme die Sicherheit digitaler Prüfungen gewährleistet.

Dieser Beitrag untersucht die Rolle technischer Lösungen im Allgemeinen und fokussiert dann auf SEB als eine der effektivsten Anwendungen. Ziel ist es, zu zeigen, wie solche Technologien aktuellen Herausforderungen wie KI-Missbrauch und digitalem Betrugsverhalten begegnen, gleichzeitig das Vertrauen in Prüfungssituationen stärken und die grundlegenden akademischen Werte festigen können.

2 Akademische Integrität: Konzept, Relevanz und Herausforderungen

Akademische Integrität bezeichnet die Verpflichtung zu einem ehrlichen, verantwortungsbewussten und ethisch fundierten Verhalten im akademischen Kontext. Sie umfasst die konsequente Orientierung an professionellen Standards, Prinzipien und Praktiken sowie an einem kohärenten Wertesystem, das Entscheidungen und Handlungen in Bildung, Forschung und Wissenschaft leitet. In Anlehnung an die Definition des Europäischen Netzwerks für akademische Integrität (ENAI) wird akademische Integrität somit als normativer Orientierungsrahmen verstanden, der über die bloße Einhaltung formaler Regeln hinausgeht (Tauginiené, et al., 2023). Diese Perspektive ergänzt die des International Center for Academic Integrity (ICAI), das Integrität als grundlegende Haltung beschreibt, welche sicherstellt, dass alle Mitglieder der akademischen Gemeinschaft Wissen auf faire, verantwortliche und ethisch legitime Weise generieren und teilen. Beide Konzepte betonen nicht allein die Vermeidung von Fehlverhalten, sondern auch die aktive Förderung einer akademischen Kultur, die durch Ehrlichkeit, Vertrauen, Fairness, Respekt, Verantwortung sowie Mut geprägt ist (International Center for Academic Integrity, 2021).

Die Bedeutung akademischer Integrität liegt in ihrer Rolle als Grundpfeiler für qualitativ hochwertige Bildung und Forschung. Sie gewährleistet, dass Lernprozesse authentisch ablaufen und Studierende echte Kompetenzen erwerben, anstatt durch Täuschung voranzukommen (Rotzal & Walger, 2016). In einer global vernetzten Wissensgesellschaft stärkt sie das Vertrauen in akademische Institutionen und schützt den Wert von Abschlüssen. Darüber hinaus fördert sie die ethische Entwicklung von Studierenden,



Abbildung 1: Fundamentale Bestandteile der akademischen Integrität (eigene Darstellung in Anlehnung an International Center for Academic Integrity, 2021)

indem sie Verantwortungsbewusstsein schult. Ohne Integrität würde der Bildungsprozess entwertet, da Noten und Zertifikate nicht mehr die tatsächliche Leistung widerspiegeln (Walger, 2014).

Akademische Integrität ist somit ein zentraler Grundsatz wissenschaftlicher Arbeit, steht jedoch vor wachsenden Herausforderungen, die durch die fortschreitende Digitalisierung erheblich verschärft werden. Traditionelle Formen wissenschaftlichen Fehlverhaltens, wie Plagiate, unzulässige Zusammenarbeit oder die Fälschung von Daten, bleiben bestehen. Die Digitalisierung von Prüfungsformaten führt jedoch zu neuen Risiken, insbesondere durch den zunehmend leichten Zugang zu KI-gestützten Chatbots (Theisen, 2023). Der Einsatz solcher KI-Technologien, wie beispielsweise ChatGPT, birgt erhebliche Gefahren für die akademische Integrität. Studierende können mit diesen Werkzeugen mühelos Inhalte generieren und als eigene Arbeit ausgeben, was die Authentizität ihrer Leistungen in Frage stellt. Besonders in digitalen Prüfungen erschwert die unauffällige Nutzung solcher Tools die Nachweisbarkeit von Verstößen erheblich. Dies untergräbt nicht nur die Glaubwürdigkeit der von Studierenden erbrachten Leistungen, sondern gefährdet auch die Validität und Fairness akademischer Bewertungen (Debby, Cotton, & Shipway, 2023).

Studien zeigen, dass KI-generierte Texte oft nicht von menschlichen unterschieden werden können, was zu einer Zunahme von Täuschung führt (Perkins, 2023). Weitere Herausforderungen umfassen den unkontrollierten Zugriff auf Online-Ressourcen während Prüfungen, was durch schwache Überwachungssysteme begünstigt wird. Ethische Dilemmata entstehen, da die Nutzung von KI nicht immer klar als Verstoß definiert ist, und Erkennungssysteme wie KI-Detektoren unzuverlässig sind (Plata, De Guzman, & Quesad, 2023). Insgesamt verdeutlichen diese

Entwicklungen, dass der Einsatz technischer Lösungen kein fakultatives Zusatzinstrument („Nice-to-Have“) darstellt, sondern heutzutage zu einer unabdingbaren Voraussetzung für die Durchführung von Klausuren geworden ist. Nur durch solche Maßnahmen können proaktiv gleiche Prüfungsbedingungen für alle Studierenden gewährleistet werden. Insbesondere in digitalen Prüfungsszenarien kommt der Sicherung akademischer Integrität durch technische Vorkehrungen eine zentrale Bedeutung zu.

3 Technische Ansätze zur Sicherung akademischer Integrität

Technische Lösungen nehmen somit heutzutage eine zentrale Funktion bei der Sicherung akademischer Integrität ein, insbesondere in digitalen Lern- und Prüfungsumgebungen (Eaton, 2022). Sie umfassen ein breites Spektrum an Werkzeugen und Systemen, die darauf ausgerichtet sind, Verstöße zu erkennen, zu verhindern und eine Kultur der wissenschaftlichen Ehrlichkeit zu fördern. Im Unterschied zu rein administrativen Maßnahmen ermöglichen diese Lösungen automatisierte und skalierbare Ansätze. Sie adressieren Herausforderungen wie Plagiate, unerlaubte Kollaboration und den Missbrauch generativer KI, indem sie Detektionsverfahren, präventive Maßnahmen und die didaktisch sinnvolle Gestaltung digitaler Prüfungen kombinieren (McHaney, Cronan, & Douglas, 2018).

3.1 Detektionssysteme

Detektionssysteme zielen primär auf die Nachverfolgung von Fehlverhalten ab. Ein prominentes Beispiel sind Plagiatserkennungssoftwares, die eingereichte Texte mit umfangreichen Datenbanken aus Internetquellen, wissenschaftlichen Artikeln und früheren Arbeiten von Studierenden vergleichen, um Ähnlichkeitsberichte zu erstellen (Eaton, 2022). Viele dieser Systeme integrieren mittlerweile KI-Schreibdetektion, um Texte zu erkennen, die durch generative Modelle wie ChatGPT, Gemini oder Claude erzeugt wurden (Ibrahim, Alotaibi, & Sibai, 2025). Allerdings ist die Zuverlässigkeit dieser KI-Detektion stark eingeschränkt. Studien und Erfahrungsberichte zeigen, dass die Algorithmen vieler Anbieter ungenau sind, mit Erkennungsraten oft unter 70 % (Krishna, Song, Karpinska, Wieting, & Iyyer, 2023), und häufig Fehlalarme auslösen, bei denen menschliche Texte fälschlich als KI-generiert markiert werden, oder KI-Texte, insbesondere paraphrasierte oder hybride Inhalte, unentdeckt bleiben. Besonders bei kurzen, kreativen oder unkonventionell formatierten Texten versagt die Erkennung regelmäßig (Weber-Wulff, et al., 2023). Einige Universitäten, wie Vanderbilt University in Nashville, Tennessee (Vanderbilt University, 2023) oder die American University in Washington, D.C., (The Eagle, American University Student Media, 2023) haben die KI-Detektionsfunktionalitäten solcher Tools deaktiviert, da sie als unzuverlässig gelten. Obwohl die derzeitige KI-Erkennung kein belastbares Beweismittel für wissenschaftliches Fehlverhalten darstellt, unterstützen solche Tools die Lehrenden dabei, den Studierenden hilfreiches Feedback zu Zitierpraktiken zu geben und ihnen durch Hinweise auf Fehler ihre Lernentwicklung zu erleichtern (Weber-Wulff, et al., 2023).

3.2 Präventive Technologien

Präventionsmechanismen hingegen verhindern Verstöße proaktiv, insbesondere in Online-Prüfungen (Hussein & Qutaiba, 2022). Hierzu gehören bspw. Safe Exam Browser und Respondus LockDown Browser, die den Zugriff auf externe Ressourcen einschränken, das Kopieren von Inhalten blockieren und die Nutzung anderer Anwendungen unterbinden. Systeme wie Honorlock kombinieren dies mit KI-basiertem Proctoring, das Video- und Audioüberwachung einsetzt, um verdächtiges Verhalten zu erkennen – etwa das Verwenden von Sekundärgeräten wie Smartphones oder das Sprechen mit Dritten. AI-Flagging-Algorithmen analysieren Bewegungen, Geräusche und Bildschirmaktivitäten in Echtzeit, während zusätzliche Kameras (z. B. seitliche Ansichten) den Prüfungsraum überwachen (Honorlock Online Proctoring, 2025). Weitere Tools wie ExamSoft bieten digitale Prüfungsplattformen mit biometrischer Authentifizierung, um die Identität der Prüflinge zu sichern (Slusky, 2020).

3.3 Gestaltungsbasierte Prävention

Darüber hinaus tragen technische Lösungen zur Förderung akademischer Integrität durch gestaltungsbezogene Ansätze bei (Slusky, 2020). Die gezielte Konfiguration digitaler Prüfungen, angepasst an die spezifischen Anforderungen und Rahmenbedingungen der Prüfungsdurchführung, kann die unerlaubte Zusammenarbeit zwischen Studierenden während der Prüfung erheblich erschweren. So ermöglichen Prüfungssteuerungsverfahren beispielsweise die Generierung oder Auswahl zufällig zusammengestellter Fragen für jede einzelne Studentin bzw. jeden einzelnen Studenten, die dynamische Abbildung und Strukturierung der Prüfung sowie die sequentielle Präsentation der Inhalte. Diese Maßnahmen reduzieren die Möglichkeiten der Kollaboration deutlich. Gängige Lernmanagementsysteme wie Moodle integrieren Prüfungssteuerungsverfahren direkt in ihre Standardfunktionen, sodass diese ohne zusätzlichen organisatorischen Aufwand oder Installation weiterer Software konfiguriert werden können (Fiedler & Kästner, 2021).

3.4 Fazit

Die Vorteile der beschriebenen technischen Lösungen liegen insbesondere in ihrer Skalierbarkeit und Effizienz: Sie reduzieren den administrativen Aufwand für Lehrende, fördern faire Prüfungsbedingungen und stärken das Vertrauen in digitale Abschlüsse (Coghlan, Miller, & Pater, 2021). Empirische Studien zeigen, dass solche Lösungen Täuschungsraten senken können, indem sie Abschreckung und edukative Maßnahmen kombinieren. Dennoch bestehen Herausforderungen: Datenschutzbedenken, etwa im Zusammenhang mit der Speicherung biometrischer Daten, können ethische Konflikte hervorrufen, und algorithmische Verfahren bergen Bias-Risiken (Kuleva & Miladinov, 2024). Darüber hinaus sind technische Lösungen nicht unfehlbar – die Umgehung der Systeme durch besonders findige Studierende erfordert ergänzende pädagogische Maßnahmen (Fidas, et al., 2023).

Angesichts des wachsenden Bedarfs an der Sicherstellung akademischer Integrität ist eine stärkere Implementierung solcher Tools in Bildungssystemen gegenwärtig dringend geboten. Während die meisten Softwarelösungen kommerzieller Natur sind, sticht der Safe Exam Browser hervor: Als Open-Source-Lösung kann er von Bildungseinrichtungen wie Schulen, Hochschulen und Weiterbildungseinrichtungen kostenfrei genutzt werden und bietet erweiterte Funktionalitäten zur Sicherstellung akademischer Integrität (Schneider, Volk, Lehre, Bauer, & Piendl, Der Safe Exam Browser, 2012). Aus diesem Grund liegt in diesem Beitrag ein besonderer Fokus auf dem Safe Exam Browser und seinen Einsatzmöglichkeiten zur Förderung akademischer Integrität.

4 Der Safe Exam Browser: Funktionen, Vorteile und Einsatzmöglichkeiten

Der Safe Exam Browser stellt eine umfassende Lösung für die sichere Durchführung digitaler Prüfungen dar und adressiert die Herausforderungen der Digitalisierung in der Bildung. Im Folgenden werden die Funktionen, Vorteile und Einsatzbereiche sowie Praxisbeispiele von Safe Exam Browser detailliert analysiert, um ein umfassendes Verständnis seiner Rolle in der Hochschulbildung und darüber hinaus zu vermitteln.

4.1 Technische Funktionen und Merkmale

Der Safe Exam Browser (SEB) repräsentiert eine der führenden Open-Source-Lösungen für die sichere Durchführung digitaler Prüfungen. SEB wurde speziell entwickelt, um die Integrität von Online-Klausuren zu gewährleisten, indem er unbefugten Zugriff auf externe Ressourcen verhindert (Schneider, Volk, Lehre, Bauer, & Piendl, Der Safe Exam Browser. Innovative Software zur Umsetzung von Online-Prüfungen an der ETH Zürich, 2012). SEB operiert primär im sogenannten Kiosk-Modus, einem eingeschränkten Betriebsmodus für Computer, Tablets oder andere Endgeräte, der ausschließlich die Ausführung einer spezifischen Anwendung gestattet und sämtliche anderen Funktionen sperrt. Diese Kernfunktion ermöglicht es SEB, einen Rechner temporär in eine geschützte Arbeitsstation umzuwandeln, die den Zugriff auf externe Ressourcen, Systemfunktionen wie Task-Manager oder Bildschirmfreigabe sowie andere Anwendungen, Dateien oder Websites unterbindet. Navigations-elemente wie Adressleisten oder Tabs werden deaktiviert, wodurch die Prüfungsumgebung abgesichert wird (ETH Zürich / Safe Exam Browser, 2025).

Im Kontext der fortschreitenden Digitalisierung von Bildungsprozessen adressiert SEB gezielt Risiken wie Täuschungsversuche oder die unbefugte Nutzung von Online-Ressourcen. Durch die Schaffung einer kontrollierten Prüfungsumgebung verhindert SEB effektiv den Missbrauch von Suchmaschinen oder KI-Tools wie ChatGPT. Darüber hinaus ermöglicht die nahtlose Integration in bestehende Lernmanagementsysteme (LMS) eine effiziente Implementierung in Bildungseinrichtungen (ETH Zürich / Safe Exam Browser, 2025), wodurch SEB einen wesentlichen Beitrag zur Sicherstellung der akademischen Integrität bei Prüfungen leistet.

Die Software ist plattformübergreifend verfügbar für Windows, macOS und iOS, mit Fokus auf Barrierefreiheit gemäß WCAG-Standards, um Inklusion zu gewährleisten. Integrationen mit gängigen LMS wie Moodle, ILIAS oder Canvas – sowie anderen vergleichbaren Systemen – erfolgen über Konfigurationsdateien, die Prüfungsadministratoren anpassen können, um spezifische Einschränkungen wie Tastenkombinationen oder erlaubte URLs zu definieren (ETH Zürich / Safe Exam Browser, 2025).

4.2 Vorteile und Stärken

SEB bietet zahlreiche Vorteile, die ihn zu einer bevorzugten Lösung für die sichere Durchführung digitaler Prüfungen machen. Einer der zentralen Vorteile ist die Förderung fairer Prüfungsbedingungen durch die Reduzierung von Täuschungsmöglichkeiten, was das Vertrauen in digitale Abschlüsse stärkt. Praktische Erfahrungen zeigen, dass SEB die Täuschungsraten in Online-Prüfungsumgebungen deutlich reduziert (Santhakumar, 2024).

Darüber hinaus zeichnet sich SEB durch seine Kosteneffizienz und Skalierbarkeit als Open-Source-Software aus. Bildungseinrichtungen können SEB ohne Lizenzgebühren implementieren, was insbesondere für Institutionen mit begrenzten finanziellen Ressourcen von Vorteil ist. Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Pflege durch ein engagiertes Entwicklerteam gewährleistet zudem die langfristige Einsatzfähigkeit und Anpassungsfähigkeit der Software an zukünftige Anforderungen (Schneider, Volk, Lehre, Bauer, & Piendl, Der Safe Exam Browser, 2012).

Ein weiterer Vorteil von SEB liegt im Datenschutz. Im Gegensatz zu kommerziellen Lösungen, die häufig biometrische Verfahren nutzen, erfolgt die Nutzung von SEB lokal und wird von der jeweiligen Institution verwaltet. So werden nur minimale Daten erfasst und die DSGVO eingehalten. Praktische Anwendungen an Hochschulen wie der ETH Zürich und der Hochschule München zeigen, dass SEB datenschutzkonform sichere Prüfungsumgebungen ermöglicht (Bandtel, et al., 2021).

SEB ermöglicht zudem eine erhöhte Flexibilität für Institutionen, insbesondere solche mit begrenzten PC-Pool-Kapazitäten, durch die Unterstützung von „Bring Your Own Device“ (BYOD)-Szenarien. Dies reduziert die Abhängigkeit von umfangreicher Infrastruktur, wie der Ausstattung von Computern oder der Bereitstellung spezieller Prüfungsräume, und fördert die Digitalisierung von Prüfungsprozessen. Darüber hinaus bietet SEB die Möglichkeit, Online-Klausuren in abgesicherten Umgebungen durchzuführen, was insbesondere für Studierende im Ausland, beispielsweise im Rahmen von Auslandssemestern, von Vorteil ist (Schneider, et al., 2012). Durch ein durchdachtes Prüfungssetting, bei dem neben dem mit SEB gesicherten Hauptgerät ein zusätzliches mobiles Gerät zur Überwachung des Arbeitsbereichs der Studierenden eingesetzt wird, können auch Studierende an entfernten Standorten sicher an Prüfungen teilnehmen. Dies erhöht die Flexibilität für Bildungseinrichtungen erheblich, da geografische Einschränkungen minimiert werden (Sylla, Babou, & Ouya, 2022).

Für Studierende bietet SEB trotz einer initialen Einrichtung eine hohe Benutzerfreundlichkeit, die durch klare Anweisungen und vereinfachte Abläufe den Prüfungsstress minimiert. Die Software trägt zur Wahrung der akademischen Integrität bei, da alle Prüfungsteilnehmenden unter gleichen, kontrollierten Bedingungen getestet werden, was das Vertrauen in die Fairness des Prüfungsprozesses stärkt (Søgaard, 2016).

Zusammenfassend bietet SEB eine Kombination aus Sicherheit, Kosteneffizienz, Datenschutzkonformität und Flexibilität, die es zu einer zukunftsorientierten Lösung für digitale Prüfungen macht, sowohl vor Ort als auch in digitalen und internationalen Kontexten.

4.3 Einsatzbereiche und Praxisbeispiele

SEB findet breite Anwendung in der Hochschulbildung, insbesondere für remote oder hybride Prüfungen, wo er durch seine Plattformübergreifbarkeit und einfache Integration in Lernmanagementsysteme wie Moodle oder Canvas flexibel einsetzbar ist (Sylla, Babou, & Ouya, 2022).

Institutionen wie die ETH Zürich setzen den SEB für E-Assessments in Studiengängen wie Maschinenbau, Bauingenieurwesen, Management, Gesundheitswissenschaften und Erdwissenschaften ein (Halbherr et al., 2016). Ähnliche Anwendungen finden sich international: Am Imperial College London in Großbritannien wird SEB genutzt, um sichere Online-Assessments in den Naturwissenschaften durchzuführen, indem es den Zugriff auf externe Ressourcen während der Prüfung blockiert und so die akademische Integrität schützt (Imperial College London, 2025). Die Monash University in Australien integriert SEB in ihre digitalen Prüfungen, um Kopieren und Teilen von Inhalten zu verhindern, was besonders in hybriden Lernformaten die Fairness gewährleistet (Monash University, 2025). Außerdem belegen Fallstudien, dass SEB in Pandemie-Szenarien die Aufrechterhaltung der Lehrkontinuität ohne Qualitätsverluste ermöglichte. Ein Beispiel hierfür ist die Universität Trakia in Bulgarien, an der SEB während der COVID-19-Pandemie die Durchführung von Prüfungen unterstützte und somit den Übergang zur digitalen Lehre beschleunigte (Kiryakova, 2021). Auch in Entwicklungsländern wie Indonesien wird SEB an der Dharmawangsa University für Prüfungen implementiert, um sichere, skalierbare Testumgebungen zu schaffen (Fadly, Purwanto, Putri, & Pratiwi, 2024).

In Kombination mit Proctoring-Software – also Tools zur digitalen Überwachung von Prüfungen durch Video-, Audio- und Bildschirm-Analyse – eignet sich SEB besonders für Massenprüfungen, bei denen Tausende Studierende simultan getestet werden, ohne physische Überwachung (Uramová, Moravčík, Šterbák, & Remeň, 2022). Hier fungiert SEB als Lockdown-Browser, der den Gerätezugang einschränkt, während Proctoring-Lösungen wie OctoProctor verdächtigtes Verhalten in Echtzeit erfassen. Solche Kombinationen reduzieren nicht nur Täuschungsrisiken, sondern ermöglichen auch skalierbare Prüfungen in globalen Kontexten (OctoProctor, 2025).

Weitere Einsatzbereiche umfassen berufliche Zertifizierungen und Weiterbildungen, wo SEB die Glaubwürdigkeit von Ergebnissen sichert, z. B. in IT-Zertifizierungen von Unternehmen wie Talview, die SEB für remote Lernumgebungen einsetzen, um faire Bewertungen in der beruflichen Weiterbildung zu gewährleisten (Talview, 2025).

Auch an der Hochschule Mittweida wurde SEB erfolgreich sowohl für groß angelegte als auch für kleinere Prüfungen eingesetzt, wobei wichtige Erkenntnisse für die optimale Umsetzung gewonnen wurden:

- **Prüfungen in PC-Pools:** Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn SEB-Prüfungen in den dafür vorgesehenen PC-Pools der Hochschule durchgeführt werden. Bei großen Prüfungen empfiehlt sich eine wellenförmige Organisation, bei der die Inhalte durch randomisierte Fragengestaltung aus Fragenpools individuell für jeden Studierenden dynamisch generiert werden. Dies erhöht die Fairness und minimiert Täuschungsmöglichkeiten.
- **BYOD-Szenario als Alternative:** Falls nicht ausreichend PC-Pools verfügbar sind, bietet das BYOD-Szenario eine flexible Lösung. Dabei ist jedoch zu beachten, dass bereits bei 50 gleichzeitig teilnehmenden Studierenden eine hohe Belastung des WLANs entstehen kann. Vor der Durchführung solcher Szenarien sollte daher ein Lasttest der WLAN-Infrastruktur in den Veranstaltungsräumen erfolgen. Zudem müssen ausreichende Lademöglichkeiten für die Endgeräte der Studierenden bereitgestellt werden, um technische Ausfälle während der Prüfung zu vermeiden.
- **Zentralisierte Kompetenzstelle:** Die Einrichtung einer zentralen Institution, die Expertise in der Organisation und Durchführung von SEB-Prüfungen bündelt, erweist sich als äußerst vorteilhaft. An der Hochschule Mittweida übernimmt das Institut für Wissenstransfer und digitale Transformation diese Aufgabe. Es pflegt und entwickelt die Kompetenzen im Umgang mit SEB und unterstützt die Fakultäten während der Prüfungsphasen. Diese zentrale Unterstützung ist besonders wertvoll, da die Organisation solcher Prüfungen an den Fakultäten oft nur saisonal am Semesterende anfällt.
- **Vorbereitende Simulationen:** Vor der Durchführung von SEB-Prüfungen sollten intensive Simulationen sowohl für Lehrende als auch für Studierende durchgeführt werden. Solche Probeläufe ermöglichen es beiden Seiten, sich mit dem Ablauf vertraut zu machen, reduzieren Stress und decken Optimierungspotenziale im Prüfungsprozess auf.

Diese Erkenntnisse unterstreichen die Vielseitigkeit von SEB und seine Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche infrastrukturelle und organisatorische Rahmenbedingungen.

5 Grenzen, Lösungsansätze und kritische Reflexion technischer Systeme

Technische Lösungen wie SEB bieten effektive Werkzeuge zur Sicherstellung akademischer Integrität, stoßen jedoch auf Grenzen, die eine differenzierte Betrachtung erfordern. Diese umfassen technische, ethische, rechtliche und pädagogische Herausforderungen. Die folgende Analyse beleuchtet diese Einschränkungen, schlägt Lösungsansätze vor und reflektiert kritisch die Rolle von SEB in der digitalen Prüfungspraxis, um eine ausgewogene und nachhaltige Integration solcher Technologien zu fördern.

5.1 Einschränkungen präventiver Systeme

Trotz der robusten Lockdown-Funktionen von SEB können Täuschungsversuche nicht vollständig ausgeschlossen werden. Studierende könnten Sekundärgeräte, virtuelle Maschinen oder unauffällige Hilfsmittel wie drahtlose Kopfhörer nutzen, um Prüfungsbeschränkungen zu umgehen. Insbesondere bei Online-Klausuren bleiben gewisse Limitationen bestehen, da selbst ein Überwachungssetting mit einem zusätzlichen mobilen Gerät zur Kontrolle des Arbeitsbereichs die Kooperationsbereitschaft der Studierenden voraussetzt. Eine 360-Grad-Überwachung ist praktisch nicht umsetzbar, da sie unverhältnismäßige Anforderungen an die Studierenden stellen würde. Zudem können technische Probleme wie Systemabstürze oder Kompatibilitätsprobleme die Prüfungsleistung beeinträchtigen und Frustration verursachen (Sitzmann, Ely, Bell, & Bauer, 2010).

Lösungsansatz: Eine verbesserte Kommunikation mit Studierenden ist essenziell, um die Notwendigkeit und Funktionsweise von SEB zu erläutern und sie auf die Prüfung einzustimmen. Ergänzend können Simulationen vor der eigentlichen Klausur durchgeführt werden, in denen Studierende in einer stressfreien Umgebung die Handhabung von SEB testen können (Fischer & Dieterich, 2021). Dies reduziert technische Unsicherheiten, minimiert Prüfungsstress und fördert die akademische Integrität durch transparente Vorbereitung.

5.2 Datenschutz und ethische Herausforderungen

Ein häufiger Kritikpunkt an digitalen Prüfungssystemen ist der Datenschutz. Studierende äußern oft Bedenken hinsichtlich der Privatsphäre bei der Nutzung solcher Software (Coghlan, Miller, & Pater, 2021). SEB adressiert diese durch seinen Kiosk-Modus, der lokal installiert ist und keine invasiven Überwachungsmethoden wie biometrische Verifikation nutzt. Dennoch erfordert dies eine klare und transparente Kommunikation, um Ängste und Vorurteile abzubauen und die datenschutzkonforme Funktionsweise von SEB zu verdeutlichen.

Eine weitere Schwäche zeigt sich bei der Durchführung von Massenprüfungen mit Tausenden Teilnehmenden, da SEB keine integrierte Identitätsverifikation bietet. Dies kann die Integration kommerzieller Proctoring-Lösungen erforderlich machen, die wiederum datenschutzrechtliche Bedenken hervorrufen können.

Lösungsansatz: Eine intensive Aufklärungskampagne ist notwendig, um Studierende über die datenschutzfreundliche Gestaltung von SEB zu informieren. Bei großen Prüfungen können organisatorische Maßnahmen wie randomisierte Fragenpools oder wellenförmige Prüfungsdurchführung die Notwendigkeit externer Proctoring-Tools reduzieren und die Prüfungssicherheit gewährleisten.

5.3 Herausforderungen bei BYOD-Szenarien

Obwohl SEB durch BYOD-Szenarien die Flexibilität von Institutionen erhöht, bestehen infrastrukturelle Herausforderungen. Eine stabile WLAN-Verbindung und ausreichende Lademöglichkeiten für Geräte sind unerlässlich, insbesondere bei Präsenzprüfungen in Hochschulräumen. Fehlende oder unzureichende Infrastruktur kann die Durchführung beeinträchtigen. Zudem könnten Studierende ohne geeignete Endgeräte benachteiligt sein.

Lösungsansatz: Institutionen sollten in die Bereitstellung stabiler WLAN-Netzwerke und ausreichender Lademöglichkeiten investieren, um BYOD-Szenarien zu unterstützen. Für Studierende ohne geeignete Geräte können kleinere institutionelle PC-Pools als Ausweichlösung bereitgehalten werden, um Inklusion und Chancengleichheit zu gewährleisten (Fischer & Dieterich, 2021).

5.4 Kritische Reflexion: Technik als Ergänzung, nicht Ersatz

Technische Lösungen wie SEB können keine umfassende Kultur der akademischen Integrität allein schaffen. Sie behandeln Symptome von Fehlverhalten, nicht dessen Ursachen, und könnten pädagogische Ansätze verdrängen. Eine nachhaltige Strategie erfordert die Kombination von Technologie mit ethischer Bildung und intensiver Kommunikation mit Studierenden und Lehrenden (Lee & Fanguy, 2022). Zudem müssen soziale Ungleichheiten, wie ungleicher Zugang zu Technologie, berücksichtigt werden, um Benachteiligungen zu vermeiden (Fischer & Dieterich, 2021).

In diesem Zusammenhang wird auch ein weitergehender Forschungsbedarf deutlich, insbesondere hinsichtlich einer stärkeren Orientierung an didaktischen Theorien. Die Debatte um technische Werkzeuge wie SEB in der Leistungsbewertung bleibt häufig auf einer technisch-instrumentellen Ebene der Messung stehen, bei der implizite Annahmen zu Validität und Reliabilität nicht ausreichend reflektiert werden. Zukünftige Studien sollten daher verstärkt pädagogische Theorien einbeziehen, um zu untersuchen, wie technische Präventionsmaßnahmen sinnvoll mit lernförderlichen Prüfungsformaten verknüpft werden können. Dies könnte zur Entwicklung evidenzbasierter Leitlinien beitragen, die nicht nur Täuschung minimieren, sondern zugleich ein vertieftes Verständnis von Kompetenzerwerb fördern, beispielsweise durch vergleichende Analysen zwischen SEB-gestützten und offenen Prüfungsformaten. Solche Ansätze würden die Debatte differenzieren und technische Lösungen klar als Ergänzung einer ganzheitlichen didaktischen Konzeption positionieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Grenzen technischer Lösungen wie SEB nicht zu vernachlässigen sind, ihre Vorteile jedoch eindeutig überwiegen. Durch transparente Kommunikation, organisatorische Maßnahmen, technische Optimierungen und die Integration pädagogischer Ansätze können diese Einschränkungen effektiv adressiert werden.

SEB stellt dabei eine effektive und vielseitige Open-Source-Lösung dar, um die akademische Integrität in digitalen Prüfungsumgebungen zu gewährleisten. Durch seinen Kiosk-Modus, die nahtlose Integration in Lernmanagementsysteme und die Unterstützung von BYOD-Szenarien adressiert SEB gezielt die Herausforderungen der Digitalisierung, wie Täuschungsversuche und den Missbrauch von KI-Tools. Die Kosteneffizienz, Datenschutzkonformität und hohe Flexibilität machen SEB insbesondere für Bildungseinrichtungen mit begrenzten Ressourcen attraktiv. Empirische Studien belegen, dass SEB Täuschungsraten signifikant reduziert und das Vertrauen in digitale Abschlüsse stärkt (Kaussow, Stelzner, Gerlach, & Fischer, 2024).

Im Vergleich zu alternativen Prüfungsformen wie Hausarbeiten, deren Erstellung ebenfalls nicht vollständig kontrollierbar ist und die primär auf Selbstverantwortung sowie auf nachträgliche Überprüfbarkeit durch Plagiatserkennungssoftware setzen, bietet SEB insbesondere in Echtzeitszenarien eine deutlich höhere technische Absicherung. Während Hausarbeiten aufgrund offener Recherchemöglichkeiten und langer Bearbeitungszeiträume ein erhöhtes Risiko für den Einsatz KI-gestützter Hilfsmittel aufweisen, reduziert SEB den unmittelbaren Zugriff auf externe Ressourcen erheblich (Theisen, 2023). Dieser Vergleich verdeutlicht, dass keine Prüfungsform vollständig täuschungssicher ist, wodurch die Notwendigkeit hybrider Prüfungsansätze in Kombination mit pädagogischen Begleitmaßnahmen hervorgehoben wird.

Dennoch bestehen beim Einsatz von SEB Grenzen, wie die Möglichkeit der Umgehung durch Sekundärgeräte, technische Probleme oder infrastrukturelle Anforderungen bei BYOD-Szenarien. Diese können durch transparente Kommunikation, Simulationen zur Prüfungsvorbereitung und organisatorische Maßnahmen wie randomisierte Fragenpools gemindert werden. Eine kritische Reflexion zeigt, dass technische Lösungen wie SEB allein keine umfassende Kultur der Integrität schaffen können. Sie müssen durch pädagogische Ansätze und ethische Bildung ergänzt werden, um nachhaltig zu wirken und soziale Ungleichheiten zu berücksichtigen (Søgaard, 2016).

Die bisherigen Erfahrungen mit SEB verdeutlichen sein Potenzial als robuste Grundlage für sichere digitale Prüfungen, sowohl vor Ort als auch in Online-Kontexten. Zugleich zeigen die praktischen Anwendungen und bestehenden Grenzen von SEB, dass weiterer Forschungsbedarf besteht. Besonders vielversprechend sind dabei Langzeitstudien, die untersuchen, wie sich der Einsatz von SEB auf die akademische Kultur, das Vertrauen in digitale Prü-

fungsformate sowie auf den chancengleichen Zugang zu Technologie in unterschiedlichen Bildungskontexten auswirkt.

Literaturverzeichnis

- Bandtel, M., Baume, M., Brinkmann, E., Bedenlier, S., Budde, J., Eugster, B., . . . Sari, Z. (2021). Digitale Prüfungen in der Hochschule: Whitepaper einer Community Working Group aus Deutschland, Österreich und der Schweiz. Berlin: Hochschulforum Digitalisierung.
- Coghlan, S., Miller, T., & Pater, J. (2021). Good Proctor or "Big Brother"? Ethics of Online Exam Supervision Technologies. *Philosophy & Technology*, 34(4), 1581-1606. doi:10.48550/arXiv.2011.07647
- Debby, C. R., Cotton, P. A., & Shipway, J. (2023). Chatting and Cheating: Ensuring academic integrity in the era of ChatGPT. *Innovations in Education & Teaching International*.
- Eaton, S. (2022). The Academic Integrity Technological Arms Race and its Impact on Learning, Teaching, and Assessment. *Canadian Journal of Learning and Technology*, 48(2), 1-9. doi:10.21432/cjlt28388
- ETH Zürich / Safe Exam Browser. (25. Oktober 2025). *Safe Exam Browser – Übersicht*. Von Safe Exam Browser: https://safeexambrowser.org/about_overview_de.html abgerufen
- Fadly, Y., Purwanto, D., Putri, R. E., & Pratiwi, N. A. (2024). The Impact Analysis Of Secure Online Safe Exambrowser (Seb) Implementation In English Semesterexaminations. *The 2nd Annual Dharmawangsa International Conference 2024*. 4, pp. 363-370. Medan: UPT. Penerbitan dan Publikasi Ilmiah. doi:<https://doi.org/10.46576/prosundhar.v4i1>
- Fidas, C., Belk, M., Constantinides, A., Portugal, D., Martins, P., Pietron, A., . . . Avouris, N. (2023). Ensuring Academic Integrity and Trust in Online Learning Environments: A Longitudinal Study of an AI-Centered Proctoring System in Tertiary Educational Institutions. *Education Sciences*, 13(6), 566.
- Fiedler, M., & Kästner, M. (21. July 2021). Möglichkeiten von OpalExam zur Verbesserung von Klausurbewertung und -einsicht. *Lessons Learned*, 1(1/2), 21-1-21-7. doi:10.25369/ll.v1i1/2.21
- Fischer, E., & Dieterich, P. (4. Februar 2021). Digitale Prüfungen - Ein aktueller Überblick über die prüfungsrechtlichen Anforderungen. *Forschung & Lehre 02-2021 Digitales Semester*, S. 110-111.
- Fricke, J., Bauer-Hägele, S., & Horn, D. e. (2019). *Peer-Learning in der Lehrer*innenbildung: Gemeinsam und auf Augenhöhe lernen* (Bd. 19. Jahrgang (2019) Heft 3). Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt. doi:<https://doi.org/10.35468/jlb-03-201901>
- Halbherr, T., Dittmann-Domenichini, N., Piendl, T., & Schlienger, C. (3. Mai 2016). Authentische, kompetenzorientierte Online-Prüfungen an der ETH Zürich. *Zeitschrift für Hochschulentwicklung*, S. 247-269.
- Honorlock Online Proctoring. (2025, Oktober 25). *Honorlock Online Proctoring Services And Software*. Retrieved from Honorlock: <https://honorlock.com/>
- Hussein, M., & Qutaiba, A. (2022, December). Cheating Prevention in E-proctoring Systems Using Secure Exam Browsers: A Case Study. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika*, 8(4), 634-648. doi:10.26555/jiteki.v8i4.25094
- Ibrahim, K., Alotaibi, D., & Sibai, F. (2025). The Robustness of AI-Classifiers in the Face of AI-Assisted Plagiarism. *International Journal of Computer-Assisted Language Learning and Teaching*, 15(1), 1-27. doi:10.4018/IJCALLT.375428
- Imperial College London. (2025, Oktober 26). *Safe Exam Browser / Faculty of Natural Sciences / Imperial College London*. Retrieved from Imperial College London: <https://www.imperial.ac.uk/natural-sciences/education-and-teaching/learning-technology-and-av-support/evaluating-effectiveness/case-studies-inspiration/safe-exam-browser/>
- International Center for Academic Integrity. (2021). *Fundamental Values of Academic Integrity*. (3rd ed.). Dayton: International Center for Academic Integrity.
- Kaussow, M., Stelzner, M., Gerlach, B., & Fischer, S. (2024). Digitale Klausuren in der Hochschulbildung - Fallstudie einer Programmieren Prüfung im Moodle mit eigener Klausurumgebung. *Fachtagung "e-Learning" der Gesellschaft für Informatik*. Bonn: Gesellschaft für Informatik.
- Kiryakova, G. (2021). Tools for creating a secure environment for online exams. *AIP Conference Proceedings*. Yambol: AIP Publishing. doi:<https://doi.org/10.1063/5.0172776>
- Krishna, K., Song, Y., Karpinska, M., Wieting, J., & Iyyer, M. (2023). Paraphrasing evades detectors of AI-generated text, but retrieval is an effective defense. *Neural Information Processing Systems* (pp. 1-32). San Diego: NeurIPS Proceedings.
- Kuleva, M., & Miladinov, O. (2024). *Exploring the Efficacy of Online Proctoring in Online Examinations: A Comprehensive Review*. Sofia: Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Conference, Veliko Tarnovo. doi:10.17770/etr2024vol2.8058
- Lee, K., & Fanguy, M. (2022, Januar 19). Online exam proctoring technologies: Educational innovation or deterioration? *British Journal of Educational Technology*, 53, 475-490. doi:<https://doi.org/10.1111/bjet.13182>

- McHaney, R., Cronan, T., & Douglas, D. (2018). Academic Integrity: Information Systems Education Perspective. *Journal of Information Systems Education*, 27(3), 153-158.
- Monash University. (2025, Oktober 26). *eExams using Safe Exam Browser - Current students*. Retrieved from Monash University | Study at Monash Uni | Melbourne: <https://www.monash.edu/students/admin/assessments/exams/browser>
- Nalyvaiko, O., Zhernovnykova, O., Nalyvaiko, N., & Molotok, V. (2022). Academic Integrity in The Conditions Forced Distance Learning. *Open educational e-environment of modern University*, 13, 89-103.
- OctoProctor. (2025, Oktober 26). *Safe Exam Browser implementation Guide / Documents*. Retrieved from OctoProctor — Online proctoring software for remote exams and assessments: <https://octoproctor.com/resources/documentation/integration-with-seb>
- Perkins, M. (2023). Academic integrity considerations of AI Large Language Models in the post-pandemic era: ChatGPT and beyond. *Journal of University Teaching and Learning Practice*, 7-24.
- Plata, S., De Guzman, M., & Quesad, A. (2023). Emerging Research and Policy Themes on Academic Integrity in the Age of Chat GPT and Generative AI. *Asian Journal of University Education*, 743-758.
- Reuter, K., Halbherr, T., Piendl, T., Lüthi, T., & Kern, M. (2023). *Competence-Oriented Exams Using Virtual Desktop Infrastructure (VDI)*. Zurich: ETH Zurich.
- Rotzal, T., & Walger, N. (2016). HochSchulen in gemeinsamer Verantwortung: Welche Wert- und Qualitätsmaßstäbe vermittelt unser Bildungssystem? *Information. Wissenschaft & Praxis*, 67(1), 81-84.
- Santhakumar, B. (2024, October 15). *How Safe Exam Browser Enhance Remote Learning Environments*. Retrieved from Talview Blog: <https://blog.talview.com/en/safe-exam-browser-remote-learning>
- Schneider, D., Volk, B., Lehre, M., Bauer, D., & Piendl, T. (2012). Der Safe Exam Browser. In G. Csanyi, F. Reichl, & A. Steiner, *Digitale Medien – Werkzeuge für exzellente Forschung und Lehre* (S. 431-441). Münster: Waxmann. doi:10.25656/01:8394 / urn:nbn:de:0111-opus-83946
- Schneider, D., Volk, B., Lehre, M., Bauer, D., & Piendl, T. (2012). Der Safe Exam Browser. Innovative Software zur Umsetzung von Online-Prüfungen an der ETH Zürich. In G. Csanyi, F. Reichl, & A. Steiner, *Digitale Medien - Werkzeuge für exzellente Forschung und Lehre* (S. 431-441). Münster: Waxmann. doi:10.25656/01:8394
- Sitzmann, T., Ely, K., Bell, B., & Bauer, K. (2010). The Effects of Technical Difficulties on Learning and Attrition during Online Training. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 16(3), 281-292.
- Slusky, L. (2020). Cybersecurity of Online Proctoring Systems. *Journal of International Technology and Information Management*, 29(1), 56-83. doi:10.58729/1941-6679.1445
- Søgaard, T. (2016). *Mitigation of Cheating Threats in Digital BYOD Exams*. Department of Computer and Information Science. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- Sylla, K., Babou, B., & Ouya, S. (2022). Secure Dematerialization Of Assessments In Digital Universities Through Moodle, WebRTC And Safe Exam Browser (SEB). *19th International Conference on Cognition and Exploratory Learning in Digital Age (CELDA 2022)* (S. 259-266). Lisbon: International Association for Development of the Information Society (IADIS).
- Talview. (2025, Oktober 26). *How Safe Exam Browser Enhance Remote Learning Environments*. Retrieved from World's First Agentic AI for Proctoring and Interviewing | Talview: <https://blog.talview.com/en/safe-exam-browser-remote-learning>
- Tauginienė, L., Gaižauskaitė, I., Glendinning, I., Kravjar, J., Ojsteršek, M., Ribeiro, L., . . . Sivasubramaniam, S. (2023). *Glossar für akademische Integrität. . ENAI-Bericht 3G [online]*. Brno: Europäisches Netzwerk für akademische Integrität.
- The Eagle, American University Student Media. (2023, December 6). *Part I: AI: Artificial intelligence or academic integrity?* Retrieved October 1, 2025, from The Eagle: <https://www.theeagleonline.com/article/2023/12/part-i-ai-artificial-intelligence-or-academic-integrity>
- Theisen, M. (Dezember 2023). ChatGPT: Risiken, Gefahren und Chancen in Lehre und Forschung. *Zeitschrift für Studium und Forschung Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, S. 17-23.
- Uramová, J., Moravčík, M., Šterbák, M., & Remeň, J. (2022). Effective Supervision Of Students' Activity During Online Distance Learning And Testing. *INTED2022 Proceedings*. Online Conference: IATED Academy. doi:10.21125/inted.2022.1260
- Vanderbilt University. (2023, August 16). *Guidance on AI Detection and Why We're Disabling Turnitin's AI Detector*. Retrieved October 1, 2025, from Brightspace by Vanderbilt University: <https://www.vanderbilt.edu/brightspace/2023/08/16/guidance-on-ai-detection-and-why-were-disabling-turnitins-ai-detector/>
- Walger, N. (2014). Editorial: Akademische Integrität – Eine Gemeinschaftsaufgabe. *Information. Wissenschaft & Praxis*, 65(1), 1.

Weber-Wulff, D., Anohina-Naumeca, A., Bjelobaba, S., Foltýnek, T., Guerrero-Dib, J., Popoola, O., . . . Waddington, L. (2023). Testing of detection tools for AI-generated text. *International Journal for Educational Integrity*, 19(25), 1-39.
doi:10.1007/s40979-023-00146-z

ZionStar Private Limited. (2025, Oktober 25). *Sublime LMS / Securing online assessments using safe exam browser*. Retrieved from Sublime LMS:
<https://www.sublimelms.com/securing-online-assessments-using-safe-exam-browser>

How Mathematics Keeps Our Data Safe: The RSA Cryptosystem for Regular Numbers

Mandy Lange-Geisler, Klaus Dohmen

Contact: Mandy Lange-Geisler, Hochschule Mittweida, mlange1@hs-mittweida.de

Abstract

Modern Internet applications, such as online banking, private chats and blockchains, rely on secure cryptographic techniques that require profound mathematical knowledge, particularly in modular arithmetic—a subfield of number theory.

This article, aimed at non-experts, promotes a basic understanding of modular arithmetic by examining the RSA cryptosystem and its recent multi-prime multi-power generalization for moduli $n > 1$ and messages which are regular modulo n . While, at first glance, this generalization appears to restrict the message space, it is shown that this restriction is negligible in practice, since under reasonable assumptions almost all messages are regular modulo n .

The article can be read without deep mathematical prerequisites. Key concepts, such as modular arithmetic, are introduced where necessary and illustrated with examples.

Keywords: modern cryptography, modular arithmetic, RSA, multi-prime RSA, multi-power RSA, regular number modulo n

1 A Brief Introduction to Modern Cryptography

Modern cryptography differs from classical cryptography in that it uses methods that are executed on a computer. Mechanical devices such as the Enigma rotor machine, which was used in World War II, are not considered part of modern cryptography. The history of modern cryptography dates back to the early days of the internet in the 1970s, when the need arose to establish a secure connection between two computers in an open or untrusted network.

Fundamental to understanding modern cryptography is the process of encryption and decryption. *Encryption* is a method for transforming data by using a key in such a way that it becomes unreadable to unauthorized parties. Only those in possession of the corresponding key can reconstruct the message—a process which is referred to as *decryption*. This distinguishes encryption fundamentally from a mere password check. While a local login on a personal computer typically involves comparing the entered password with a stored value, this is not considered secure for transmitting data over an untrusted network. Such data need to be additionally distorted to ensure that the communication becomes private and secure. A common everyday example is browsing the Internet. In the address bar of the browser securely encrypted websites are indicated by <https://>, which stands for *Hypertext Transfer Protocol Secure*. The additional “s” denotes “secure” and indicates that the connection is protected via the Transport Layer Security (TLS) protocol (Rescorla 2018). This is particularly essential for sensitive online services, where personal data and payment information are transmitted.

In such cases, encryption prevents unauthorized access, as any unencrypted data transferred over the Internet could otherwise be read in plaintext by an adversary. Modern cryptographic schemes are therefore indispensable and form the foundation of secure communication.

Basically, a distinction is made between symmetric and asymmetric encryption schemes. The principle of symmetric encryption can be illustrated with a simple example. Two users, commonly referred to in the literature as Alice and Bob, wish to communicate over an unsecure channel, such as the Internet. From a cryptographic perspective, the scenario becomes interesting due to the presence of an adversary, often called Eve, who has access to the channel and can potentially eavesdrop. This problem of maintaining confidentiality over an insecure medium is the classical use case for symmetric encryption. Alice and Bob use the same secret key for both encryption and decryption. Alice encrypts her *plaintext* (the cleartext message) using the shared secret key, thus producing the *ciphertext*. She sends the ciphertext to Bob, who then decrypts it using the same secret key. Decryption is thus the inverse operation of encryption. The underlying assumption is that the encryption algorithm is secure enough to prevent the adversary Eve from extracting any meaningful information about the plaintext from the ciphertext.

Symmetric encryption schemes are computationally efficient and are commonly used for fast encryption of large amounts of data. However, they suffer from the drawback that the secret key must be exchanged securely between the communication parties, which poses a challenge in open or untrusted networks. This is where asymmetric encryption schemes come into play.

Asymmetric cryptosystems rely on a pair of keys: a public key, which is openly accessible and used for encryption, and a private key, which remains secret and is used for decryption. If Alice wants to send a message to Bob, she uses Bob’s public key to encrypt the message. Only Bob can then decrypt the message by using the corresponding private key. The principle of public-key encryption is fundamental to most modern cryptographic schemes, most notably the RSA cryptosystem, published by Rivest, Shamir, and Adleman (1978), which even nowadays is vitally used and subject of extensive research.

Unlike traditional symmetric cryptosystems, asymmetric systems are based on more advanced mathematics, including number theory methods, which requires a higher level of mathematical abstraction and precision. For this reason, this article, though aimed at non-experts, is deliberately not written in a popular science style. For supplementary popular science reading, we refer to Singh (1999).

The remainder of this article is organized as follows. In Section 2 we introduce some basic mathematical concepts from modular arithmetic that are fundamental to understanding the RSA cryptosystem, which is then introduced in Section 3 along with a survey of some of its variants. In Section 4 we expand our knowledge of modular arithmetic

acquired in Section 2 and build a bridge towards a fascinating, but little-noticed topic of number theory, which previously seemed to be unrelated to cryptography. To be more precise, we introduce the concept of a *regular number modulo n* , which goes back to Morgado (1972) and is based on ideas of von Neumann (1936) in the context of pseudoinverses in regular rings. Based on this concept and some related results, we present a new generalization of the RSA cryptosystem in Section 5, which we refer to as *General Multi-Prime Multi-Power RSA*, where the modulus n in the public and private key is not restricted to products of two different primes as in standard RSA, but can be any product of prime powers (Dohmen and Lange-Geisler 2025a). A superficial drawback is that the encryptable messages must be given as regular numbers modulo n , but the good news are that under reasonable assumptions this is provably almost always the case, whence the restriction is insignificant from a practical point of view. In Section 8 we draw some conclusions and provide an outlook on future work.

2 Modular Arithmetic

Almost all cryptographic schemes are based on integer computations and modular arithmetic. Luckily, no floating point numbers are used.

Modular arithmetic traces back to Gauß (1801), who developed this field in his book *Disquisitiones Arithmeticae*, which includes classical divisibility results such as Fermat’s Little Theorem from 1640 and Euler’s theorem from 1763, which are essential for the correctness of modern cryptographic schemes.

When you divide an integer m by a positive integer n , you get a unique integer quotient q and a unique remainder r between 0 and $n - 1$ (inclusive); mathematically, $m = q \cdot n + r$ where $q, r \in \mathbb{Z}$ (the set of integers) and $r \in \{0, \dots, n - 1\}$. The remainder is denoted as $m \bmod n$, read as *m modulo n* . For example, when you divide 16 by 12, you get a quotient of 1 and a remainder of 4, so $16 \bmod 12 = 4$.

In cryptography, one is almost always interested in the remainder $m \bmod n$ of a division, not in the quotient. In addition to the *modulo operation* there is a *modulo relation* in which two integers a and b are considered *equivalent* if they have the same remainder when divided by n , i.e., if $a \bmod n = b \bmod n$, or to put it differently, if n evenly divides $a - b$. One then writes $a \equiv b \pmod{n}$, and calls a and b *congruent modulo n* ; e.g. as in $16 \equiv 4 \pmod{12}$. The latter example exhibits an obvious analogy with a clock: 16 o’clock corresponds to 4 o’clock on a 12-hour clock face.

The possible remainders when dividing through by n are combined into a set

$$\mathbb{Z}_n = \{0, \dots, n - 1\}.$$

When we add or multiply two elements from $\mathbb{Z}_n$, we apply the mod n operation afterwards to ensure that the results remain in $\mathbb{Z}_n$. For example, for $n = 12$ as above, we have $7 + 8 = 3$ in analogy with the 12-hour clock face: If we start working at 7 o’clock and work for 8 hours, then we stop working at 3 o’clock.

The number n in the mod n operation is called a *modulus*. In cryptography, such moduli are very huge numbers with more than 600 decimal digits for non-military applications.

3 RSA and Its Variants

RSA, named after Rivest, Shamir, and Adleman (1978), is the most widely studied and deployed asymmetric cryptosystem, forming the foundation of numerous protocols and applications, including digital signatures, encryption schemes, and public-key infrastructures.

RSA utilizes a public modulus n , which is a product of two distinct secret primes p and q , and its security is based on the difficulty of an attacker finding these primes when only n is known. In computational number theory, this problem is referred to as the *factorization problem*. Although it is easy to multiply two numbers (in our case, two prime numbers p and q) to determine their product n , the reverse task of factoring n appears to be difficult, when n is large. No one has yet found an efficient factorization algorithm for conventional computer architectures, nor is there any proof that such an algorithm does not exist. Quantum computers, on the other hand, can solve the factorization problem efficiently (Shor 1997) and will be able to break RSA in the long term.

Similar to other asymmetric systems, messages in RSA are encrypted and decrypted by modular operations. This requires that all messages, including text messages, are unambiguously represented by numbers. There are various ways of achieving this, e.g., interpreting the bit encoding of a text as a binary number, or extending the decimal digit set by letters and, if necessary, other symbols, in order to interpret textual messages as numbers in an alphabetic numeral system, similar to the ancient systems of Greek and Hebrew numerals.

Standard RSA uses a public key (n, e) for encryption and a private key (n, d) for decryption where, as stated above, n is the product of two distinct primes p and q , which are kept secret. In practice, these primes are very huge numbers, which are generated from a cryptographically secure random number generator. In order to determine e and d in the public resp. private key, one proceeds as follows. Using the secret primes p and q , one first determines $\nu(n)$ as the result of Euler’s (1763) totient function

$$\varphi(n) = (p - 1)(q - 1)$$

or, as in most modern implementations, as the result of Carmichael’s (1914) lambda function

$$\lambda(n) = \text{lcm}(p - 1, q - 1),$$

which gives the least common multiple of $p - 1$ and $q - 1$. The numbers e and d in the public resp. private key are then chosen such that

$$1 < e, d < \nu(n)$$

and

$$ed \equiv 1 \pmod{\nu(n)},$$

meaning that e and d are inverses of each other modulo $\nu(n)$.

Encryption and decryption of a message $m \in \mathbb{Z}_n$ is conducted by computing the encryption function

$$\text{enc}(m) = m^e \bmod n,$$

respectively the decryption function

$$\text{dec}(m) = m^d \bmod n.$$

It can be proved (cf. Rivest, Shamir, and Adleman 1978) that for every $m \in \mathbb{Z}_n$,

$$\text{dec}(\text{enc}(m)) = m,$$

showing that decryption reverses encryption.

As an example, consider $n = 77 = 7 \cdot 11$ with $\nu(n) = \lambda(n) = \text{lcm}(6, 10) = 30$. Since $7 \cdot 13 \equiv 1 \pmod{30}$, we may choose $e = 7$ and $d = 13$. Thus, $(77, 7)$ and $(77, 13)$ are our public and private key, respectively. Encryption of $m = 5$ gives $\text{enc}(5) = 5^7 \bmod 77 = 47$, while decryption of 47 gives $\text{dec}(47) = 47^{13} \bmod 77 = 5$.

There are many variants of RSA aiming at improved efficiency and security. Variants such as multi-prime RSA (Collins et al. 1998) and multi-power RSA (Takagi 2004) allow for alternative forms of the modulus n . In multi-prime RSA, the modulus is composed of three or more distinct prime factors, whereas in multi-power RSA, it is the product of a prime and a prime power, which requires a different decryption function in order to achieve correctness. These variants are useful in various application scenarios where the advantages of smaller key sizes and/or faster decryption justify potential security trade-offs—for example, in resource-constrained environments.

The *General Multi-prime Multi-power RSA* scheme (Dohmen and Lange-Geisler 2025a) constitutes a generalization of the standard RSA scheme by combining the principles of both multi-prime and multi-power RSA, while the encryption and decryption methods remain identical to standard RSA. This generalization allows for an arbitrary modulus $n > 1$ and is provably correct for all messages which are *regular modulo n* . This latter concept is introduced in the following section.

4 Regular Numbers Modulo n

The concept of a regular number modulo n originates from Morgado (1972), who was inspired by von Neumann’s work on pseudoinverses in regular rings (von Neumann 1936). Its close connection with cryptography, especially with the RSA cryptosystem, was first discovered by the present authors (Dohmen and Lange-Geisler 2025a). Although the notion may initially appear abstract, the concept is viable and simple.

To make it short, an integer $m \in \mathbb{Z}$ is called *regular modulo n* , if there exists an integer $x \in \mathbb{Z}$ satisfying the congruence

$$m^2 x \equiv m \pmod{n},$$

or equivalently, if n evenly divides $m^2 x - m$ for some integer x . The integer x is referred to as a *pseudoinverse of m modulo n* and is not necessarily unique.

We are particularly interested in the regular elements of $\mathbb{Z}_n$. For this reason, we introduce a dedicated notion for this set and write

$$\mathbb{Z}_n^{\text{reg}} = \{m \in \mathbb{Z}_n \mid m \text{ is regular modulo } n\}.$$

As an example, for $n = 12$, Table 1 shows all $m \in \mathbb{Z}_{12}^{\text{reg}}$ with their pseudoinverses $x \in \mathbb{Z}_{12}$.

Table 1: $\mathbb{Z}_{12}^{\text{reg}}$ with pseudoinverses in $\mathbb{Z}_{12}$.

$m \in \mathbb{Z}_{12}^{\text{reg}}$	$x \in \mathbb{Z}_{12}$
0	0, ..., 11
1	1
3	3, 7, 11
4	1, 4, 7, 10
5	5
7	7
8	2, 5, 8, 11
9	1, 5, 9
11	11

What makes this set $\mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$ so special? The reason lies in our multi-prime multi-power variant of RSA to be presented in Section 5. While $\mathbb{Z}_n$ is the set of possible messages in standard RSA, our new variant requires all messages to be regular modulo n , that is, to be elements of $\mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$. Although this may appear to be a limitation at first glance, it actually isn’t. Using a combinatorial argument the present authors (Dohmen and Lange-Geisler 2025a) proved that under reasonable assumptions almost all messages in $\mathbb{Z}_n$ are regular modulo n . More precisely, if n is a product of powers of r distinct k -bit primes, then under uniform distribution the probability that a random message $m \in \mathbb{Z}_n$ belongs to $\mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$ is at least $1 - r/2^{k-1}$, which quickly tends to 1 as $k \rightarrow \infty$. So there is nothing to worry about.

Another interesting fact is that $\mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$ is a commutative semigroup with respect to multiplication modulo n , which means that the product of any two elements in $\mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$ is again in $\mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$. This will be of importance for our encryption and decryption procedures in Section 5 as it guarantees that a ciphertext message is regular modulo n if the respective plaintext message is regular modulo n .

The connection with so-called unitary divisors of n is also exciting. A divisor d of n is called *unitary* if d and n/d have no common positive divisor other than 1. We write $d \parallel n$ if d is a unitary divisor of n . The present authors (Dohmen and Lange-Geisler 2025b) gave four different proofs that $\mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$ contains exactly

$$\varrho(n) = \sum_{d \parallel n} \varphi(d)$$

elements (Morgado 1972), where $\varphi(d)$ denotes Euler’s totient function, which gives the number of positive integers less than d and coprime to d . For example, we find that $\varrho(12) = \varphi(1) + \varphi(3) + \varphi(4) + \varphi(12) = 1 + 2 + 2 + 4 = 9$, in accordance with Table 1 on the left-hand side.

Notably, the sequence $\varrho(1), \varrho(2), \dots$ appears as sequence A055653 in the On-Line Encyclopedia of Integer Sequences (OEIS 2025).

5 Multi-prime Multi-power RSA

Following the preparations in the previous sections, we now introduce the *General Multi-prime Multi-power RSA* scheme (Dohmen and Lange-Geisler 2025a). This scheme allows for arbitrary integer moduli $n > 1$, meaning that the modulus can be any non-empty product of distinct primes powers, that is, $n = p_1^{e_1} \dots p_r^{e_r}$ with distinct primes $p_1, \dots, p_r$ and integer exponents $e_1, \dots, e_r \geq 1$. We refer to such a scheme as of type $(e_1, \dots, e_r)$, where e_i indicates the multiplicity of prime p_i in the prime factorization of n ($i = 1, \dots, r$). In this sense, the standard RSA scheme

is of type $(1, 1)$, and the multi-prime variants are of type $(1, \dots, 1)$. Multi-power variants, where primes occur with greater multiplicity, are also covered.

In contrast to standard RSA, the generalized scheme makes use of Carmichael's function $\lambda(n)$ and Euler's totient function $\varphi(n)$ for *arbitrary* $n > 1$. $\varphi(n)$ can be computed as

$$\varphi(n) = n \prod_{p|n} \left(1 - \frac{1}{p}\right),$$

where the product is over all prime divisors p of n (Euler 1763). The computation of $\lambda(n)$ for $n = p_1^{e_1} \dots p_r^{e_r}$, following Carmichael (1914), is a bit more subtle:

$$\lambda(n) = \text{lcm}(\lambda(p_1^{e_1}), \dots, \lambda(p_r^{e_r})),$$

where $\lambda(1) = \lambda(2) = 1$, $\lambda(3) = \lambda(4) = 2$, $\lambda(2^e) = 2^{e-2}$ if $e > 2$, and $\lambda(p^e) = p^{e-1}(p-1)$ for every odd prime p . If that sounds too complicated, just use our scheme with $\varphi(n)$ at the expense of larger encryption and decryption exponents and thus possible efficiency losses.

The generalized scheme is given by the following algorithm.

Generalized RSA scheme of type $(e_1, \dots, e_r)$:

A) Key generation:

1. Randomly choose r distinct primes $p_1, \dots, p_r$.
2. Compute $n = p_1^{e_1} \dots p_r^{e_r}$ and $\nu(n) = \lambda(n)$ (alternatively, $\nu(n) = \varphi(n)$).
3. Choose $1 < e < \nu(n)$ coprime to $\nu(n)$.
4. Compute $1 < d < \nu(n)$ such that $ed \equiv 1 \pmod{\nu(n)}$.
5. Delete $p_1, \dots, p_r$ and $\nu(n)$.
6. (n, e) is the public key.
7. (n, d) is the private key.

B) Encryption and decryption:

1. $\text{enc}(m) = m^e \pmod n$ for any $m \in \mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$.
2. $\text{dec}(m) = m^d \pmod n$ for any $m \in \mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$.

Recall from Section 4 that under reasonable assumptions almost all messages in $\mathbb{Z}_n$ belong to $\mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$, so there is no disadvantage in restricting the message space to $\mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$.

If n is a product of distinct primes, then $\mathbb{Z}_n^{\text{reg}} = \mathbb{Z}_n$ and our scheme coincides with multi-prime RSA. This is because, due to Morgado (1972), all integers are regular modulo n if and only if n is squarefree, that is, if n is not divisible by the square of a prime. Thus, the original RSA scheme (1978) and its multi-prime variants by Collins et al. (1998) are specializations of our generalized scheme. As with the original RSA scheme and its multi-prime variants, decryption can be accelerated by applying the Chinese Remainder Theorem (Dohmen and Lange-Geisler 2025a).

It should be emphasized, though, that not all RSA variants follow from the present generalization. This particularly applies to Takagi's multi-power scheme (Takagi 2004).

6 A Concrete Example

Since in practice key lengths of several thousand bits are used, which correspond to numbers with hundreds of decimal digits, the numbers involved are far too large for manual computation. For this reason, we restrict ourselves to

an example with small numbers, which illustrates the underlying idea of the method, but does not provide any real security. Since even small numbers in this context may be too large for manual computation, we recommend using a computer algebra system.

In our example, we consider a multi-prime multi-power scheme of type $(2, 1, 2)$ where $p_1 = 2$, $p_2 = 3$ and $p_3 = 5$, and compute $n = 2^2 3^1 5^2 = 300$ and $\nu(n) = \lambda(n) = 20$, following Steps 1 and 2 of the key generation phase. We then choose $e = 3$ and compute $d = 7$, according to Steps 3 and 4 (without further details). Our public key is thus $(n, e) = (300, 3)$, and our private key is $(n, d) = (300, 7)$.

Now, suppose we want to encrypt $m = 11$. We first observe that 11 is regular modulo 300, since due to $11^2 \cdot 191 \equiv 11 \pmod{300}$, $x = 191$ is a pseudoinverse of 11. In order to encrypt $m = 11$, we compute

$$\text{enc}(11) = 11^3 \pmod{300} = 131.$$

Decryption of 131 works by computing

$$\text{dec}(131) = 131^7 \pmod{300} = 11.$$

Now, suppose we want to encrypt $m = 14$:

$$\text{enc}(14) = 14^3 \pmod{300} = 44.$$

Decryption of 44 gives

$$\text{dec}(44) = 44^7 \pmod{300} = 164,$$

which obviously is not correct. Why is this the case? The reason is that $m = 14$ is not regular modulo 300, since it has no pseudoinverse modulo 300, that is, there is no $x \in \mathbb{Z}$ satisfying $14^2 x \equiv 14 \pmod{300}$. Since our method only works for regular messages, it cannot be applied for this particular message. In practice, when we deal with large key sizes, this doesn't matter, since for large prime lengths almost all messages are regular. Thus, the chance to hit a non-regular message is practically almost zero. To be on the safe side, it can be efficiently tested whether a message m is regular modulo n : simply test whether $\gcd(m, n) \parallel n$.

7 Correctness

In cryptography, a cryptosystem is considered correct if decryption reverses encryption. Although this sounds obvious, giving evidence on the correctness is not trivial for most cryptosystems and requires a solid mathematical background. Due to the enormous size of the message space, the correctness of a cryptosystem cannot be tested, but must be rigorously proved. Since this article is aimed at non-experts, we will not go into the proof.

As originally proven by the present authors, the general multi-prime multi-power scheme is *correct* in the sense that it works for all messages in $\mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$, and *complete* in the sense that it works for no other message in $\mathbb{Z}_n$. More precisely, for messages $m \in \mathbb{Z}_n$,

$$\text{dec}(\text{enc}(m)) \equiv m \pmod n$$

if and only if $m \in \mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$, that is, if m is regular modulo n (Dohmen and Lange-Geisler 2025a).

Note that this implies the correctness of the original RSA scheme if n is squarefree, since in this case $\mathbb{Z}_n = \mathbb{Z}_n^{\text{reg}}$, as stated in Section 5.

Although we do not go into the proof of the correctness result, we would like to briefly mention an intermediate result that is interesting in itself. It is connected with

Carmichael’s lambda function from Section 5 and extends Carmichael’s theorem (Carmichael 1914). In an equivalent form his theorem states that for all integers m which are coprime to n ,

$$m^{\lambda(n)+1} \equiv m \pmod{n},$$

which strengthens a respective theorem of Euler (1763) on the totient function, which in turn generalizes Fermat’s Little Theorem—a classical theorem, which dates back to 1640 and which is fundamental for the majority of modern number-theoretic cryptosystems.

It can be shown that the latter congruence extends to a broader set of integers, namely those which are regular modulo n . But that’s not all. It can even be stated that this congruence holds if and only if m is regular modulo n . More generally, the following statements are equivalent (Dohmen and Lange-Geisler 2025a):

1. m is regular modulo n .
2. $m^{\lambda(n)+1} \equiv m \pmod{n}$.
3. $m^{k\lambda(n)+1} \equiv m \pmod{n}$ for all $k \in \mathbb{N}$.

The equivalence of these three statements not only provides a characterization of regular numbers modulo n in terms of Carmichael’s lambda function, but also forms the basis for the correctness and completeness proof of our general multi-prime multi-power RSA scheme, from which the correctness of the original RSA scheme follows in the particular case that n is a product of two distinct prime factors.

8 Conclusion and Outlook

From Fermat’s Little Theorem via Euler’s theorem to Carmichael’s theorem and their application to RSA, one can clearly see how deeply modern cryptography is rooted in fundamental areas of mathematics. These classical theorems guarantee the correctness of the RSA scheme and its variants and serve as the foundation of many other cryptographic methods.

In this work, we surveyed our recent generalized multi-prime multi-power RSA scheme, which retains the familiar structure of key generation, encryption, and decryption as in standard RSA. What distinguishes our approach is its natural and previously unexplored connection to the number-theoretic notion of a *regular number modulo n* . This concept, though long known but little heeded, has not yet been considered within the cryptographic framework of RSA. At first glance, restricting messages to regular numbers modulo n might seem limiting. However, from a probabilistic point of view, this restriction is practically negligible: when the modulus is composed of primes with sufficiently large bit length k , almost all potential messages are regular as $k \rightarrow \infty$.

The concept of regular numbers creates a natural bridge between number theory and cryptography, enabling a mathematically elegant and practically relevant generalization of the RSA scheme. This also offers new perspectives on other classical results, such as Carmichael’s theorem, which admit meaningful extensions in this broader framework.

Future research will focus on several directions. First, the efficiency and security implications of using prime powers in the modulus should be further explored, particularly with respect to implementation aspects and potential attack vectors. Second, connections between regular numbers and associated algebraic structures, such as semi-groups, may yield new cryptographic primitives or further generalizations of known cryptographic schemes. Finally, in light of advances in quantum computing, it remains an important challenge to investigate whether such generalized RSA schemes can be combined with post-quantum methods to provide long-term security guarantees.

References

- Carmichael, R. D. (1914). *The Theory of Numbers*. New York: Wiley.
- Collins, T. et al. (1998). *Public Key Cryptographic Apparatus and Method*. United States Patent, # 5848159.
- Dohmen, K. and M. Lange-Geisler (2025a). *General Multi-Prime Multi-Power RSA – A Generalization of RSA and CRT-RSA to Regular Integers Modulo n* . Cryptology ePrint Archive, 2025/1157. URL: <https://ia.cr/2025/1157>.
- (2025b). *On the Number of Regular Integers Modulo n and Its Significance to Cryptography*. arXiv: 2304.02471.
- Euler, L. (1763). “Theoremata arithmetica nova methodo demonstrata”. In: *Novi Comment. Acad. Sci. Imp. Petrop.* 8, pp. 74–104.
- Gauß, C. F. (1801). *Disquisitiones Arithmeticae*. Leipzig: Gerh. Fleischer.
- Morgado, J. (1972). “Inteiros regulares modulo n ”. In: *Gaz. Mat., Lisb.* 33.125-128, pp. 1–5.
- OEIS Foundations Inc. (2025). Entry A055653. URL: <http://oeis.org/A055653>.
- Rescorla, E. (Aug. 2018). *The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3*. RFC 8446. IETF. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8446>.
- Rivest, R., A. Shamir, and L. Adleman (1978). “A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems”. In: *Commun. ACM* 21.2, pp. 120–126.
- Shor, P. W. (1997). “Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer”. In: *SIAM J. Comput.* 26.5, pp. 1484–1509.
- Singh, S. (1999). *The Code Book: The Science of Secrecy from Ancient Egypt to Quantum Cryptography*. Anchor Books.
- Takagi, T. (2004). “A fast RSA-type public-key primitive modulo $p^k q$ using Hensel lifting”. In: *IEICE Trans.* E87-A.1, pp. 94–101.
- von Neumann, J. (1936). “On Regular Rings”. In: *Proc. Natl. Acad. Sci.* 22.12, pp. 707–713.

Chancen & Herausforderungen von GenAI im Marketing

Monja Steinigke

Kontakt: Steinigke, Hochschule Mittweida, steinigk@hs-mittweida.de

Zusammenfassung

Generative künstliche Intelligenz (GenAI) gewinnt im Marketing stark an Bedeutung, da sie automatisierte Inhaltserstellung, Datenanalyse und personalisierte Erlebnisse für die Kundschaft ermöglicht. Der Artikel untersucht Chancen und Herausforderungen dieser Technologie im Marketing und strukturiert die Ergebnisse mit dem Technology-Organization-Environment Framework (TOE - Framework). Die Analyse zeigt, dass GenAI erhebliche Effizienzgewinne und Wettbewerbsvorteile eröffnet, gleichzeitig jedoch Risiken wie Fehleranfälligkeit, Datenschutzprobleme und Akzeptanzbarrieren mit sich bringt.

Keywords: TOE-Framework, GenAI im Marketing, Chancen, Herausforderungen.

1 Einleitung

Der rasante Fortschritt von generativer künstlicher Intelligenz (GenAI) verändert derzeit zahlreiche Unternehmensbereiche. Von allen Unternehmensbereichen wird GenAI im Marketing und Vertrieb dabei am häufigsten eingesetzt (Statista, 2025). GenAI-Tools eröffnen gerade im Marketing viele neue Möglichkeiten, wie zum Beispiel Inhalte zu erstellen, Daten zu analysieren und die Erlebnisse der Kundschaft zu personalisieren (Kshetri, 2021; Cillo & Rubera, 2024). Gleichzeitig wirft der Einsatz von GenAI jedoch komplexe Fragen auf, die von technischen Limitierungen über organisatorische Anpassungsprozesse bis hin zu gesellschaftlichen und ethischen Implikationen reichen. In diesem Kontext widmet sich der vorliegende Beitrag der Frage, welche zentralen Chancen und Herausforderungen sich aus der Anwendung von GenAI im Marketing ergeben. Darüber hinaus wird beleuchtet, auf welche Weise Unternehmen dieses Spannungsfeld gestalten können, um Potenziale verantwortungsvoll zu nutzen und Herausforderungen zu überwinden.

Der Artikel beginnt mit den relevanten theoretischen Grundlagen und einer Erläuterung des Forschungsdesigns und der Methodik. Anschließend werden die Ergebnisse anhand des Technology-Organization-Environment Frameworks (TOE-Frameworks) sowie in Chancen und Herausforderungen geclustert und zusammengefasst. Eine kritische Diskussion und Schlussfolgerung der Ergebnisse bilden den Abschluss des Artikels.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden zunächst die theoretischen Grundlagen von GenAI definiert und anschließend dessen Anwendungsbereiche im Marketing erläutert. Anschließend wird das TOE-Framework theoretisch dargestellt, an dem sich diese Arbeit orientiert.

2.1 GenAI im Marketing

GenAI stellt eine zentrale Entwicklung im Bereich der künstlichen Intelligenz dar (Bommasani et al., 2021). In der Verordnung (EU) 2024/1689 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 werden GenAI-Modelle als „typische[] Beispiel[e] für ein KI-Modell mit allgemeinem Verwendungszweck [genannt], da sie eine flexible Erzeugung von Inhalten ermöglichen, etwa in Form von Text- Audio-, Bild- oder Videoinhalten, die leicht ein breites Spektrum unterschiedlicher Aufgaben umfassen können“ (Verordnung (EU) 2024/1689 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für künstliche Intelligenz, 2024). Bommasani et al. (2021) definieren GenAI als tiefe neuronale Netze, die anhand großer Datenmengen vortrainiert werden, um ein Basismodell zu erstellen. Um solche Modelle zu entwickeln und zu trainieren, ist der Zugang zu riesigen Mengen an Text, Bildern, Videos und anderen Daten erforderlich (Verordnung (EU) 2024/1689 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für künstliche Intelligenz, 2024). Die erstellten Basismodelle werden feinabgestimmt, um nach menschlichen Anweisungen neue Inhalte zu produzieren (Bommasani et al., 2021). Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass die trainierten Modelle auch für Aufgaben eingesetzt werden können, für die sie nicht explizit trainiert wurden und daher eine hohe Anpassungsfähigkeit auf eine Vielzahl von Anwendungsfällen haben (Bommasani et al., 2021).

Im Marketing eröffnet GenAI eine Vielzahl von Anwendungsbereichen, die sich über verschiedene Phasen und Aspekte der Marketingaktivitäten erstrecken und sowohl die Effizienz als auch die Qualität der Interaktionen mit der Kundschaft erheblich verbessern können (Kshetri, 2021; Cillo & Rubera, 2024). Ein großer Vorteil von GenAI im Marketing ist das schnelle und stark automatisierte Erstellen von Inhalten in Form von Texten, Bildern und Videos (Cillo & Rubera, 2024). Dies umfasst z.B. die Automatisierung der Bilder- und Videoerzeugung für hochrealistische Produktbilder oder ansprechende Werbung, die in Echtzeit an relevante Orte und Situationen angepasst werden kann (Cillo & Rubera, 2024). Ein weiterer wesentlicher Vorteil von GenAI im Marketing liegt in der Fähigkeit, große Datenmengen effizient zu verarbeiten und dadurch umfangreiche personalisierte Marketingmaßnahmen zu ermöglichen (Kshetri, 2021; Cillo & Rubera, 2024). Auf Grundlage von Sprachmustern, Verhaltensdaten oder demografischen Profilen können so passgenaue Inhalte erstellt und gezielt ausgespielt werden (Kshetri, 2021; Cillo & Rubera, 2024).

Für ein weiteres Verständnis der Anwendung von GenAI im Marketing werden im Folgenden kurz mögliche Anwendungsbereiche entlang der 4Ps des Marketing-Mixes dargestellt. Im Produktbereich unterstützt GenAI die Entwicklung neuer Produkte, ermöglicht eine auf die Kundschaft abgestimmte, individuelle Massenproduktion und bietet personalisierte Produktempfehlungen (Nanayakkara, 2020). So nutzt beispielweise das Kosmetikunternehmen L'Oréal GenAI, um Kommentare von Kunden und Kundinnen zu analysieren, potenzielle Produktinnovationsmöglichkeiten zu identifizieren und wertvolle Erkenntnisse aus dem Feedback der Kundschaft zu gewinnen (Heringer, 2024). Im Preisbereich wird sie für dynamische Preisgestaltung eingesetzt, analysiert Nachfrage- und Wettbewerbsdaten, prognostiziert Preiselastizitäten und ermöglicht maßgeschneiderte Preismodelle (Nanayakkara, 2020). Bei der Distribution optimiert AI Vertriebskanäle wie E-Commerce, automatisiert Bestellprozesse, ermöglicht rund um die Uhr Shopping über Chatbots und verbessert Supply-Chain- sowie Transaktionsprozesse (Nanayakkara, 2020). Schließlich bereichert sie die Promotion, indem sie personalisierte und automatisierte Kommunikation ermöglicht, Werbeinhalte optimiert, A/B-Tests und Retargeting steuert und Direktmarketing sowie die Erlebnisse der Kundschaft durch maßgeschneiderte Ansprache verbessert (Kshetri et al., 2023; Nanayakkara, 2020).

2.2 TOE-Framework

GenAI ist eine neue Technologie, die gerade erst in viele Unternehmensbereiche eingeführt wird. Zur Bewertung der Einführung von Technologien gibt es verschiedene Modelle und Rahmenwerke (Mapila & Moloi, 2024). In der Literatur werden das TOE-Framework und das Diffusion of Innovation (DOI) Framework als die bekanntesten Rahmenwerke zur Einführung von KI unter den verschiedenen Einführungstheorien genannt (Afolayan & de la Harpe, 2020; Mapila & Moloi, 2024; Oliveire & Martins, 2011). Bei beiden handelt es sich um konzeptionelle Frameworks, welche Einflussfaktoren bei der Einführung von neuen Technologien in das Unternehmen beschreibt. Das TOE-Framework ist innerhalb der Technologieakzeptanz auf Unternehmensebene vorherrschend und betrachtet diese anhand von drei Kontexten: Technologie, Organisation und Umwelt (Afolayan & de la Harpe, 2020; Mapila & Moloi, 2024). Im Gegensatz zum DOI-Framework, das sich vor allem auf technische Aspekte fokussiert, bietet das TOE-Framework eine umfassendere Perspektive auf die Technologieimplementierung, indem es eine Reihe von Komponenten einbezieht, weshalb es für die hier vorliegende Arbeit ausgewählt wurde (Zhu et al., 2006).

Das TOE-Framework wurde von Tornatzky und Fleischer (1990) veröffentlicht. Das Framework besteht aus einem theoretischen Rahmen, der dabei helfen soll, zu verstehen, welche Bedingungen dazu führen, dass im Unternehmen technische Innovationen angenommen oder abgelehnt werden (Tornatzky et al., 1990). Dabei haben die Autorinnen und Autoren drei relevante Sektionen identifiziert: den technologischen, den organisatorischen und den Umweltkontext.

In Bezug auf den technologischen Kontext sind insbeson-

dere die internen und externen technologischen Kompetenzen der Innovationen von Relevanz, die für das Unternehmen von Bedeutung sind. Gemäß dem technologischen Kontext werden die Auswirkungen der Technologie selbst auf den Adoptionsprozess und die Implementierung analysiert (Tornatzky et al., 1990). Der organisationale Kontext, der sich mit der Implementierung technologischer Innovationen in Unternehmen befasst, untersucht die Auswirkungen interner Merkmale oder Ressourcen auf diesen Prozess (vgl. Tornatzky et al., 1990). Der Umweltkontext bezeichnet die Gesamtheit externer Faktoren, die Einfluss auf die Implementierung neuer Technologien in einem Unternehmen nehmen können und bezieht sich somit auf das Umfeld, in dem das Unternehmen agiert (vgl. Tornatzky et al., 1990).

3 Forschungsdesign und Methodik

Ziel dieser Arbeit ist es, Chancen und Herausforderungen beim Einsatz von GenAI im Marketing, anhand von bestehender Literatur und eingeordnet in das TOE-Framework, herauszukristallisieren.

Der Suchstring zum Sichten der Literatur lautet: allintitle: („marketing“ OR „media“ OR „communication“) AND („advantage*“ OR „benefit*“ OR „opportunit*“ OR „limitation*“ OR „challenge*“ OR „barrier*“ OR „shortcoming*“) AND („generative AI“ OR „gen AI“ OR „generative artificial intelligence“ OR „gen artificial intelligence“). Die Suchbegriffe wurden von Mapila und Moloi (2024) übernommen und um die drei Suchbegriffe „marketing“, „media“ und „communication“ ergänzt, um die Forschung auf den Marketingbereich einzugrenzen. Zudem wurde der Begriff „artificial intelligence“ durch „generative AI“ und dessen Synonyme ersetzt, um gezielt das zu untersuchen.

Im Rahmen der durchgeführten Recherche wird auf die Datenbank "Web of Science" zurückgegriffen. Es werden keine zeitlichen Eingrenzungen vorgenommen, da das Thema GenAI in den letzten Jahren, erst durch die Veröffentlichung von ChatGPT in 2022 besondere Relevanz erlangt und die wissenschaftliche Auseinandersetzung dazu erst begonnen hat (Bengesi et al., 2024). Bei der verwendeten Literatur handelt es sich um Primärliteratur aus wissenschaftlichen Publikationen, Konferenzbeiträgen und Forschungsberichten. Insgesamt wurden anhand der Suchbegriffe zehn Publikationen gefunden.

Alle Artikel, die keinen Bezug zu der hier behandelten Forschungsfrage hatten, wurden durch systematische Überprüfung und inhaltliche Analyse ihrer Abstracts und Methodikabschnitte ausgeschlossen. Die Abstracts und Methodikabschnitte wurden für die Überprüfung ausgewählt, da sie dabei helfen, die Relevanz der Studie für eine bestimmte Forschungsfrage zu beurteilen (Andrade, 2011; Eldawlatly & Meo, 2019). Jeder Abstract enthält eine kurze Übersicht über die gesamte Arbeit, einschließlich Hintergrund, Methoden, Ergebnisse und Schlussfolgerungen, sodass die Lesenden schnell feststellen können, ob die Arbeit für ihre Interessen relevant ist (Andrade, 2011). Der Abschnitt zur Methodik beschreibt detailliert das Studiendesign, den Rahmen, die Proband:innen, die Datenerhebung, die Datenanalyse und ethische Überlegungen und bietet Einblicke in die Durchführung der Forschung,

wodurch Transparenz und Reproduzierbarkeit gewährleistet werden (Eldawlatly & Meo, 2019). Es werden nur diejenigen Publikationen berücksichtigt, die sich explizit mit den Chancen und Herausforderungen von GenAI im Marketing befassen. Insgesamt wurden so vier der zehn Artikel ausgeschlossen. Um Verzerrungen durch Übersetzungen zu vermeiden, wurden ausschließlich deutsch- und englischsprachige Publikationen einbezogen. Die verbleibenden drei Artikel wurden vollständig ausgewertet; die darin aufgeführten Chancen und Herausforderungen von GenAI im Marketing wurden extrahiert und thematisch geclustert. Zudem fanden auch die in den Artikeln zitierten Primärquellen Berücksichtigung. In folgender Tabelle findet sich eine Übersicht der analysierten Artikel.

Tabelle 1: Analyisierte Artikel.

Autor:innen (Jahr)	Titel
Cillo, P., & Rubera, G. (2024)	Generative AI in innovation and marketing processes: A roadmap of research opportunities
Kshetri, N., Dwivedi, Y. K., Davenport, T. H., & Panteli, N. (2023)	Generative artificial intelligence in marketing: Applications, opportunities, challenges, and research agenda
Sahebi, S., & Formosa, P. (2025)	The AI-mediated communication dilemma: Epistemic trust, social media, and the challenge of generative artificial intelligence

4 Inhaltsbewertung

Im folgenden Abschnitt werden die Chancen und Herausforderungen der Nutzung von GenAI im Marketing auf Grundlage der ausgewerteten Literatur dargestellt. Die identifizierten Aspekte werden dabei den Kategorien des TOE-Frameworks zugeordnet und anschließend erläutert.

4.1 Chancen von GenAI im Marketing

Im Folgenden werden zunächst die Chancen der Nutzung von GenAI im Marketing aufgezeigt (siehe Anhang, Tabelle 2).

Technologische Faktoren

Die technischen Eigenschaften von GenAI eröffnen vielfältige Chancen für den Einsatz im Marketing. Cillo & Rubera (2024) nennen als zentralen Vorteil die Benutzerfreundlichkeit: Viele GenAI-Tools, wie ChatGPT, bieten eine intuitive und benutzerfreundliche Oberfläche, die es Marketingfachleuten erleichtert, verschiedene Aufgaben auszuführen, ohne spezielle Fähigkeiten zu benötigen. Diese wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit ist ein wichtiger Faktor für die Technologieakzeptanz und hat zu einer weiten Verbreitung geführt (Cillo & Rubera, 2024). Des Weiteren heben Cillo & Rubera (2024) die Verarbeitung verschiedener Datentypen und eine hohe Skalierbarkeit von GenAI als Chance hervor. Fortgeschrittene Tools wie GPT-4 akzeptieren Bild- und Texteingaben, und an-

dere, wie z.B. DALL-E2, können realistische visuelle Inhalte und Kunstwerke basierend auf Textanweisungen generieren, die für das Marketing genutzt werden können (Cillo & Rubera, 2024). Diese Multimodalität und die Fähigkeit zur schnellen und kostengünstigen Erstellung von Inhalten ermöglichen es, Marketinginhalte effizient und in großem Umfang zu personalisieren (Cillo & Rubera, 2024). Darüber hinaus lässt sich sowohl die Datenaufnahme als auch der Output flexibel skalieren und an den gewünschten Umfang anpassen (Cillo & Rubera, 2024). Kshetri et al. (2023) sehen eine Chance darin, dass GenAI-Tools die Fähigkeit besitzen, sich durch mehr Daten kontinuierlich weiterzuentwickeln. Sie lernen und passen sich im Laufe der Zeit an (Kshetri et al., 2023). Durch die Interaktion der Nutzenden mit empfohlenen Inhalten können die Systeme ihre Empfehlungen auf Basis dieser Feedback-Daten verfeinern (Kshetri et al., 2023). Dies führt zu einem positiven Kreislauf aus Feedback und Verbesserung, der zu immer genaueren und maßgeschneiderten Vorschlägen führt (Kshetri et al., 2023). Diese Lern- und Verbesserungsfähigkeit wird von Marketingfachleuten als ein wichtiger Nutzen von GenAI angesehen (Kshetri et al., 2023).

Organisatorische Faktoren

Auf organisatorischer Ebene eröffnet der Einsatz von GenAI im Marketing ein breites Spektrum an Chancen. Ein zentraler Vorteil liegt in der schnellen und weitgehend automatisierten Erstellung von Inhalten (Cillo & Rubera, 2024, Kshetri et al., 2023). Kshetri et al. (2023) führen an, dass GenAI-gestützte Tools zum Beispiel die Effizienz von Prozessen wie Keyword-Recherche im Marketing steigern können. Vor allem aber, kann GenAI bei der Ideen- und Kreativitätsförderung unterstützen (Cillo & Rubera, 2024, Kshetri et al., 2023). GenAI ist in der Lage, erste vielfältige Vorschläge zu generieren, diese können dann anschließend weiterentwickelt und genauer ausgearbeitet werden (Dahl & Moreau, 2002). Oder aber sie lehnen die vorgeschlagenen Ideen ab. Dabei entsteht die Möglichkeit, dass ausgehend von dem Ablehnen zusätzlicher kognitive Aufwand entsteht, der ebenfalls die Kreativität steigern kann (Luo & Toubia, 2015). Eine von Cillo & Rubera (2024) zitierte Studie von Girotra et al. (2023) zeigt zudem, dass von GenAI generierte Inhalte mit einer höheren Kaufabsicht potenzieller Konsumentinnen und Konsumenten verbunden sind. Damit besitzt GenAI das Potenzial, die Effektivität und Produktivität im Marketing erheblich zu steigern (Cillo & Rubera, 2024; Kshetri et al., 2023). Als weitere Chance listen alle drei untersuchten Artikel die durch GenAI verbesserte Datenanalyse und das Datenverständnis auf. GenAI unterstützt Unternehmen dabei, große Datensätze schneller zu verstehen, zu analysieren und zielgruppenspezifisch nutzbar zu machen (Cillo & Rubera, 2024; Kshetri et al., 2023; Sahebi & Formosa, 2025). Sahebi & Formosa (2025) heben dabei hervor, dass GenAI auch dazu eingesetzt werden kann, die Perspektiven und Meinungen von Minderheiten sichtbar zu machen. Durch die Simulation gezielter Identitäts- und Persönlichkeitsprofile lassen sich Einstellungen verschiedener Bevölkerungsgruppen – etwa nach Geschlecht, Ethnie, Generation oder deren Kombinationen – modellieren (Cillo & Rubera, 2024). Dadurch können Subpopulationen von Konsu-

ment:innen nachgebildet und soziokulturelle Merkmale im Antwortverhalten eines GenAI-Systems simuliert werden (Cillo & Rubera, 2024).

Analysen, die für Menschen erheblichen Zeitaufwand erfordern würden, können somit innerhalb weniger Sekunden durchgeführt werden (Dwivedi et al., 2021). Da viele GenAI-gestützte Prozesse schneller ablaufen als manuelle Arbeiten, werden nicht nur Zeit, sondern auch Personalressourcen und Kosten für ein Unternehmen eingespart (Cillo & Rubera, 2024; Kshetri et al., 2023). Insgesamt tragen diese Fähigkeiten dazu bei, zentrale marktorientierte Vermögenswerte eines Unternehmens – wie Beziehungen zu den Kundinnen und Kunden und Marktinformationen – zu stärken und somit einen nachhaltigen Wettbewerbsvorteil zu schaffen, der langfristig den Unternehmenswert für Aktionäre erhöht (Cillo & Rubera, 2024).

Umweltfaktoren

Wie bereits dargelegt, eröffnet GenAI signifikante Chancen durch die Generierung von empathischem, zeitnahe, relevantem und personalisiertem Marketinginhalt (Cillo und Rubera, 2024; Kshetri et al., 2023). Die hohe Datenverarbeitungs- und Anwendungsfähigkeit von GenAI ermöglicht es dem Marketing, die richtige Botschaft zur richtigen Zeit an die richtige Zielgruppe zu senden, was in einem verbesserten und personalisierten Erlebnis für die Kundschaft resultiert (Kshetri et al., 2023). Ein besseres Kundenerlebnis sorgt dafür, dass die Kundinnen und Kunden sich stärker an Produkte und Marken binden, was wiederum einen positiven Einfluss auf die Loyalität der Kundschaft hat (Grewal et al., 2017). Cillo & Rubera (2024) berichten von den Ergebnissen einer Studie, in der Studierende und ChatGPT-4 denselben Prompt zur Ideengenerierung erhielten. Im Nachgang wurde festgestellt, dass die von ChatGPT-4 generierten Ideen höhere Durchschnittswerte bei der Kaufabsicht aufweisen (Girotra et al., 2024). Eine Studie von Bai et al. (2023) besagt, dass Menschen die von GenAI erstellten Botschaften als sachlicher und logischer empfinden. Eine weitere Studie von Karinshak et al. (2023) berichtet, dass von GPT3 erstellte Pro-Impf-Botschaften als umgangssprachlicher, authentischer und positiver wahrgenommen werden.

4.2 Herausforderungen von GenAI im Marketing

Neben den eben aufgezeigten Chancen, birgt die Nutzung von GenAI im Marketing aber auch Herausforderungen, die im Folgenden aufgezeigt werden (siehe Anhang, Tabelle 3).

Technologische Faktoren

Auf der technischen Ebene kristallisieren sich drei große Herausforderungen von GenAI im Marketing heraus: Fehleranfälligkeit, Datenschutz und Komplexität.

GenAI ist nicht frei von Fehlern, was eine große Herausforderung für ihre Anwendung im Marketing darstellt (Cillo und Rubera, 2024; Sahebi und Formosa, 2025). Ein primäres Problem sind sogenannte Halluzinationen, bei denen GenAI-Modelle Inhalte produzieren, die semantisch oder syntaktisch plausibel erscheinen, aber faktisch inkorrekt oder unsinnig sind (Cillo & Rubera, 2024). Cillo &

Rubera (2025) führen als Beispiel *Metas Galactica* an, das nur drei Tage nach seiner Veröffentlichung aufgrund massiver Kritik wieder offline genommen wurde, weil es zwar wissenschaftlich klingende, jedoch inhaltlich fehlerhafte Texte erzeugte. Die besondere Tücke liegt darin, dass GenAI selbst falsche Informationen durch rhetorische Nuancen oder ungenaue Fußnoten sehr glaubwürdig erscheinen lassen kann, was zu einem fehlgeleiteten Vertrauen führen kann (Sahebi und Formosa, 2025). Für das Marketing ergibt sich aus der Fehleranfälligkeit von GenAI ein erhebliches Risiko der Verbreitung von Desinformation und einer möglichen Beeinträchtigung der Markenreputation (Cillo & Rubera, 2024). Dieses Risiko wird dadurch verstärkt, dass Inhalte in großem Umfang und zu geringen Kosten generiert werden können, wodurch auch die Verbreitung irreführender Informationen begünstigt wird (Cillo & Rubera, 2024). Kshetri et al. (2023) weist zudem darauf hin, dass Modelle wie ChatGPT mit veralteten Daten trainiert sein können, was ihre Fähigkeit beeinträchtigt, aktuelle Markttrends oder die aktuelle Wahrnehmung einer Marke zu erfassen.

Darüber hinaus sind GenAI-Modelle anfällig für Voreingenommenheit (Biases), die sie aus ihren Trainingsdaten übernehmen und reproduzieren, darunter Geschlechts-, Rassen- und wirtschaftliche Biases (Cillo & Rubera, 2024). Besonders problematisch ist, dass KI-Systeme bestehende Voreingenommenheiten subtil verstärken können, ohne dass der Nutzende dies bemerkt, was zur Internalisierung dieser Biases führen kann (Glickman & Sharot, 2024).

Die Gewährleistung des Datenschutzes stellt eine zentrale Herausforderung bei der Implementierung von GenAI im Marketing dar, was mit grundlegenden Bedenken hinsichtlich Datensicherheit und Privatsphäre zusammenhängt (Cillo & Rubera, 2024; Kshetri et al., 2023). Kshetri et al. (2023) verweisen dabei insbesondere auf das Risiko, dass sensible Daten der Kunden und Kundinnen in Prompts eingegeben werden. Da Systeme wie ChatGPT sämtliche Eingaben und Daten speichern, entsteht eine erhebliche Gefahr für den Datenschutz (Kshetri et al., 2023). Dies wirkt sich unmittelbar auf das Vertrauen der Verbrauchenden aus: Umfragen zeigen, dass sie zunehmend besorgt über den Schutz ihrer Daten sind und weniger bereit, Geschäfte mit Unternehmen einzugehen, die keine ausreichenden Sicherheitsmaßnahmen gewährleisten (Kshetri et al., 2023).

Auch für Unternehmen selbst ergeben sich Risiken beim Einsatz proprietärer Daten für das Fine-Tuning von GenAI-Modellen (Cillo & Rubera, 2024). Cillo und Rubera (2024) betonen, dass beim Teilen von unternehmenseigenem Wissen die Gefahr besteht, sensible Informationen preiszugeben. Dadurch könnten exklusive Kenntnisse oder Prozesse, die bislang einen Wettbewerbsvorteil sicherten, für andere zugänglich werden. Ein solcher Verlust an Exklusivität kann nicht nur die Wettbewerbsposition schwächen, sondern langfristig auch den Unternehmenswert mindern (Cillo & Rubera, 2024).

GenAI birgt eine hohe Komplexität, die sich in verschiedenen Aspekten ihrer Nutzung im Marketing manifestiert (Cillo & Rubera, 2024; Kshetri et al., 2023). Zur Erstellung Unternehmenseigener GenAI-Modelle müssen diese an die jeweiligen Unternehmensanforderungen angepasst werden, was spezifische Techniken wie Embeddings und

Vektordatenbanken erfordert und als sehr ressourcenintensiv gilt (Cillo & Rubera, 2024, Kshetri et al., 2023). Die Integration von GenAI in bestehende Marketing-Automatisierungssysteme und CRM-Plattformen ist ebenfalls komplex und entscheidend für die Skalierung personalisierter Erlebnisse (Kshetri et al., 2023). Zudem erfordert die effektive Bedienung von GenAI-Tools, ein tiefes Verständnis der Eingabeaufforderungen (Prompts), deren Formulierung komplex sein kann, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen (Kshetri et al., 2023). Kshetri et al. (2023) hebt hervor, dass die Einarbeitung in neue Arbeitsweisen und die Korrektur von Fehlern, erhebliche Zeit- und Frustrationskosten verursachen können. Hinzu kommt die inhärente Undurchsichtigkeit von GenAI-Systemen (oft als „Black-Box“ bezeichnet), deren kognitive Mechanismen selbst ihren Entwickler:innen nur begrenzt verständlich sind (Cillo & Rubera, 2024). Dies erschwert es den Nutzenden, die genauen Ursachen von Fehlern wie Halluzinationen oder Biases zu erkennen und zu beheben, was wiederum eine sorgfältige Überprüfung der Ergebnisse unerlässlich macht (Cillo & Rubera, 2024). Die Komplexität steigt auch, wenn verschiedene AI-Tools kombiniert werden sollen, um spezifische Marketingziele zu erreichen, da hierfür jeweils eigene Ensemble-Methoden entwickelt werden müssen (Cillo & Rubera, 2024). Letztlich stellt selbst das bloße Verständnis der vielfältigen und sich schnell entwickelnden Fähigkeiten und Angebote von GenAI-Tools eine große Hürde und Herausforderung für eine effektive Nutzung dar (Kshetri et al., 2023).

Organisatorische Faktoren

Die hohe Komplexität von GenAI, wie soeben erwähnt, übersetzt sich oft direkt in erhebliche Kosten (Cillo & Rubera, 2024; Kshetri et al., 2023). Die Entwicklung oder das Training von foundational GenAI-Modellen ist extrem kostspielig; beispielsweise wird geschätzt, dass das Training von GPT-4 über 100 Millionen Dollar gekostet hat, wie Cillo & Rubera (2025) festhalten. Auch wenn die reinen Nutzungskosten bestehender Modelle sehr gering sein können, erfordert der Zugang zu fortschrittlicheren oder spezialisierten Funktionen oft monatliche Abonnementgebühren, wie beispielsweise für Microsoft 365 Copilot oder ChatGPT Plus, die für Unternehmen, insbesondere klein und mittelständische Unternehmen, eine erhebliche finanzielle Herausforderung darstellen können (Kshetri et al., 2023). Ein weiterer wesentlicher Kostenfaktor ist die Einarbeitung der Mitarbeitenden in die neuen Arbeitsweisen, die mit GenAI einhergehen (Kshetri et al., 2023).

Neben den hohen Kosten, die als eine der fundamentalen organisationalen Herausforderungen den Einsatz von GenAI prägen, stellt auch das Misstrauen der Mitarbeitenden einen weiteren kritischen organisationalen Faktor dar, der die Einführung und Akzeptanz von GenAI erheblich beeinträchtigen kann (Kshetri et al., 2023). Ein zentraler Aspekt dieses Misstrauens ist die Angst vor Arbeitsplatzverlust (Kshetri et al., 2023). Mitarbeitende befürchten, dass GenAI-Tools ihre Aufgaben übernehmen und somit ihre Positionen überflüssig machen könnten (Kshetri et al., 2023). Laut Kshetri et al. (2023) sind besonders die Mitarbeitenden im Marketing deshalb so misstrauisch gegenüber GenAI, weil sie Bedenken hinsichtlich ihrer zukünftigen Rolle haben und das Gefühl, durch GenAI den Wert

der Abteilung gegenüber der Geschäftsleitung rechtfertigen zu müssen. Zum einen führt dies seitens der Unternehmen zu der Herausforderung, sich mit Themen wie „Deskilling“ (Entqualifizierung), „Reskilling“ (Neuqualifizierung) und den neuen Fähigkeiten auseinanderzusetzen, die im Umgang mit GenAI erforderlich sein werden (Kshetri et al., 2023). Zum anderen birgt der Übergang zu neuen Arbeitsweisen mit GenAI erhebliche Risiken für die Team- und Unternehmenskultur. Viele Unternehmen und Mitarbeitende zeigen sich zum Beispiel unwillig, GenAI für bestimmte Aufgaben zu nutzen oder sich dieser Veränderung anzunehmen (Kshetri et al., 2023). Die Integration von GenAI in die bestehende Unternehmenskultur stellt eine große Herausforderung dar, und Organisationen müssen herausfinden, wie sie Teamkultur und Prozesse anpassen können (Kshetri et al., 2023).

Die Einführung von GenAI im Marketing wirft auch Fragen zur Rolle menschlicher Kreativität auf (Cillo & Rubera, 2025). Mit der zunehmenden Integration von GenAI-Anwendungen in den Arbeitsalltag wächst die Sorge, dass kreative und damit verbundene kognitive Fähigkeiten langfristig beeinträchtigt werden könnten (Cillo & Rubera, 2025). Cillo und Rubera (2025) argumentieren, dass eine übermäßige Abhängigkeit von GenAI zur Generierung kreativer Inhalte entstehen kann. Ähnlich wie die Nutzung von GPS die Orientierungsfähigkeit reduziert hat, könnte auch eine starke Nutzung von GenAI dazu führen, dass Menschen weniger in die kognitiven Prozesse eingebunden sind, die für Kreativität wesentlich sind. Wenn sich bei der Ideenfindung überwiegend an den Vorschlägen von GenAI orientiert wird, besteht die Gefahr, dass weniger originelle Ansätze entstehen und sich Inhalte zunehmend ähneln. Dies könnte letztlich die kollektive Kreativität einschränken und zu einer Homogenisierung der Ergebnisse führen, da individuelle kognitive Beiträge der Menschen an Bedeutung verlieren (Cillo & Rubera, 2025).

Umweltfaktoren

Den Umweltfaktoren werden verschiedene Herausforderungen zugeordnet, die den Einsatz von GenAI im Marketing maßgeblich beeinflussen und weitreichende Implikationen für die Akzeptanz und Effektivität dieser Technologie haben.

Ein zentraler Umweltfaktor, ist ein bestehendes Misstrauen auf Seitens der Kundschaft und die damit einhergehende reduzierte Wahrnehmung von Authentizität, Verantwortung, Kreativität, Kompetenz und Vertrauen gegenüber Marketingmaßnahmen, insbesondere wenn die Beteiligung von KI offengelegt oder vermutet wird (Cillo & Rubera, 2024; Sahebi & Formosa, 2025). Sahebi & Formosa (2025) listen verschiedene empirische Studien dazu auf: so beschreibt eine Studie beispielsweise, dass Airbnb-Profile, die als KI-generiert wahrgenommen werden, als weniger vertrauenswürdig eingestuft werden (Jakesch et al., 2019). Eine weitere Studie fand heraus, dass das Vertrauen der Menschen in Autorinnen und Autoren einer E-Mail sinkt, wenn sie erfahren, dass KI am Schreibprozess beteiligt ist (Liu et al., 2022). Misstrauen gegenüber der Nutzung von GenAI entsteht nicht nur innerhalb von Organisationen, sondern auch bei externen Stakeholdern, die Bedenken hinsichtlich des Umganges mit ihren sensiblen

Daten entwickeln können (Kshetri et al., 2023).

Ein weiterer kritischer Umweltfaktor ist die zunehmende Technologisierung der Bindung der Kundschaft, die dazu führt, den persönlichen menschlichen Kontakt zu reduzieren und somit die Natur der Interaktionen in der Marketingumgebung verändert (Cillo & Rubera, 2024). Sahebi und Formosa (2025) zeigen auf, dass Menschen menschliche Interaktionen oft algorithmischen Interaktionen vorziehen, selbst wenn die algorithmischen Interaktionen überlegen sind. Dies kann zu einem Zielkonflikt zwischen der Erhöhung der Reichweite und Effizienz im Marketing durch GenAI und der potenziell geringeren Bindung der Kundschaft führen (Cillo & Rubera, 2024). Cillo & Rubera (2024) betonen, dass weiterer Forschungsbedarf besteht, wie Unternehmen dieses Spannungsfeld zwischen breiter Marktansprache und individuellem Erlebnis für Kundinnen und Kunden bewältigen können.

5 Diskussion und Konklusion

Die Analyse der Literatur zeigt, dass GenAI im Marketing sowohl erhebliche Chancen als auch komplexe Herausforderungen mit sich bringt. Diese Ambivalenz spiegelt sich in den technischen, organisationalen und umweltbezogenen Dimensionen wider.

Einerseits zeichnen sich GenAI-Tools durch eine hohe Benutzerfreundlichkeit aus, die eine breite Integration in den Berufsalltag ermöglicht. Andererseits wird auf die hohe Komplexität hingewiesen, die vor allem in der Einführungsphase mit Feinjustierungen, Datenintegration, aber auch später mit Prompting-Fähigkeiten verbunden ist. Diese widersprüchlichen Befunde deuten darauf hin, dass die tatsächliche Nutzbarkeit stark vom Anwendungsfall, der Einführungsphase und der Expertise der Anwenderinnen und Anwender abhängt.

Widersprüchliche Ergebnisse betreffen den Umgang mit Biases. GenAI kann einerseits durch die Simulation diverser Identitäts- und Persönlichkeitsprofile die Repräsentation marginalisierter Gruppen in der Marktforschung verbessern. Gleichzeitig besteht das Risiko, dass diese Systeme aufgrund der Daten, mit denen sie trainiert werden, bestehende Voreingenommenheiten verstärken und dadurch diskriminierende Marketingpraktiken reproduzieren. Hier bedarf es von Marketingseite einer sehr kritischen und reflektierten Nutzung von GenAI im Marketing. Selbiges gilt für den Umgang mit vertraulichen Daten.

Auf organisationaler Ebene zeigt sich ein ähnlicher Dualismus: GenAI kann die Effizienz steigern, die Content-Produktion automatisieren und (Personal-)Kosten langfristig reduzieren. Gleichzeitig erfordert die Einführung erhebliche Investitionen, sowohl finanziell als auch in Form von Umschulungen und Anpassungen der Unternehmenskultur. Besonders kritisch sind interne Widerstände und die Angst vor Arbeitsplatzverlust, die die Akzeptanz innerhalb von Marketingabteilungen mindern kann. Hier bedarf es besonderer Weitsicht, um alle Mitarbeitenden bei diesem Wandel mitzunehmen. Hinzu kommt die Sorge, dass eine Übernutzung von GenAI langfristig die menschliche Kreativität schwächen und eine Abhängigkeit von GenAI entstehen könnte. Gerade auch mit Blick auf die

Fehleranfälligkeit ist es deshalb unerlässlich, dass Unternehmen den Einsatz von GenAI nicht als Ersatz, sondern als Ergänzung menschlicher Kompetenzen verstehen.

Auch auf Umweltebene ermöglicht GenAI eine hochgradige Personalisierung und kann damit zu einem verbesserten Erlebnis für Kundinnen und Kunden, sowie zu erhöhter Loyalität beitragen. Gleichzeitig kann die Offenlegung von KI-Beteiligung Misstrauen hervorrufen und die wahrgenommene Authentizität sowie das Vertrauen in Marken untergraben. Besonders kritisch wird die Reduktion persönlicher Interaktionen gesehen, die zwar Effizienzgewinne ermöglicht, aber das Risiko geringerer Bindung der Kundschaft birgt. Damit entsteht ein Spannungsfeld zwischen Reichweite und Individualität, das Unternehmen aktiv gestalten müssen. Einerseits gilt es, Effizienz- und Reichweitengewinne durch Automatisierung zu nutzen; andererseits müssen Individualität, Authentizität und die Wahrung von Beziehungen zur Kundschaft gesichert bleiben. Nur durch diese Balance kann GenAI dazu beitragen, Wettbewerbsvorteile aufzubauen, ohne zentrale Ressourcen wie Vertrauen, Kreativität und Unternehmenskultur zu gefährden.

Zusammenfassend zeigt sich, dass GenAI im Marketing weder eindeutig als Chance noch als Risiko zu bewerten ist. Vielmehr hängt ihr Nutzen von der Balance zwischen Effizienzgewinnen, kultureller Anpassung und der Aufrechterhaltung menschlicher Kompetenzen ab. Die aufgezeigten Widersprüche verdeutlichen, dass die Wahrnehmung von GenAI nicht einheitlich ist, sondern von unterschiedlichen Faktoren abhängen kann. Künftige Forschung sollte daher genauer untersuchen, welche Personengruppen GenAI eher positiv oder negativ bewerten und inwiefern Variablen wie Alter, Persönlichkeitsmerkmale oder andere soziodemografische Faktoren diese Wahrnehmungen beeinflussen. Ebenso ist zu berücksichtigen, dass die Akzeptanz und Bewertung von GenAI kontextabhängig sein kann, beispielsweise in Bezug auf branchenspezifische Werbeeinhalte oder unterschiedliche Anwendungssituationen. Künftige Forschung sollte zudem untersuchen, wie Unternehmen Strategien entwickeln können, um diese Spannungsfelder auszubalancieren – etwa zwischen Automatisierung und Kreativität, zwischen Reichweite und der Bindung zu Kundinnen und Kunden sowie zwischen Bias-Risiken und Repräsentationspotenzial. Darüber hinaus erscheint es für die Praxis bedeutsam, zu erforschen, welche Unterschiede auf der Seite der Kundschaft zwischen von GenAI generierten und von Menschen erstellten Marketinginhalten bestehen. Solche Erkenntnisse können Unternehmen dabei unterstützen, evidenzbasiert zu entscheiden, in welchen Kontexten sich der Einsatz von GenAI tatsächlich lohnt und inwiefern er den Unternehmenserfolg beeinflusst.

Insgesamt ergeben sich daraus wesentliche Implikationen für Forschung und Praxis: Unternehmen sollten den Einsatz von GenAI nicht lediglich als technologische Innovation, sondern als strategische und kulturelle Transformationsaufgabe verstehen. Um die Potenziale von GenAI verantwortungsvoll zu nutzen, bedarf es klarer Governance-Strukturen, transparenter Kommunikationsrichtlinien und einer gezielten Qualifizierung der Mitarbeitenden

im Umgang mit dieser Technologie. Gleichzeitig sollte die Forschung verstärkt untersuchen, wie Vertrauen, Authentizität und Markenwahrnehmung durch den Einsatz von GenAI beeinflusst werden und welche Gestaltungsfaktoren eine ethisch und ökonomisch nachhaltige Nutzung fördern. Trotz aller Fortschritte bleibt klar, dass GenAI menschliche Fähigkeiten nicht vollständig ersetzt, sondern vielmehr ergänzend eingesetzt werden sollte, um Marketingprozesse nachhaltig und verantwortungsvoll zu gestalten.

6 Literaturverzeichnis

- Afolayan, A. O., & de la Harpe, A. C. (2020). The role of evaluation in SMMEs' strategic decision-making on new technology adoption. *Technology Analysis & Strategic Management*, 32(6), 697–710. <https://doi.org/10.1080/09537325.2019.1702637>
- Bai, H., Voelkel, J., Eichstaedt, J., & Willer, R. (2023). *Artificial Intelligence Can Persuade Humans on Political Issues*. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3238396/v1>
- Bengesi, S., El-Sayed, H., Sarker, M. K., Houkpati, Y., Irungu, J., & Oladunni, T. (2024). Advancements in Generative AI: A Comprehensive Review of GANs, GPT, Autoencoders, Diffusion Model, and Transformers. *IEEE Access*, 12, 69812–69837. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3397775>
- Bommasani, R., Hudson, D. A., Adeli, E., Altman, R., Arora, S., Arx, S. von, Bernstein, M. S., Bohg, J., Bosselut, A., Brunskill, E., Brynjolfsson, E., Buch, S., Card, D., Castellon, R., Chatterji, N., Chen, A., Creel, K., Davis, J. Q., Demszky, D., ... Liang, P. (2021). *On the Opportunities and Risks of Foundation Models*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07258>
- Chan, H.-L., & Choi, T.-M. (2025). Using generative artificial intelligence (GenAI) in marketing: Development and practices. *Journal of Business Research*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2025.115276>
- Cillo, P., & Rubera, G. (2024). Generative AI in innovation and marketing processes: A roadmap of research opportunities. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 53(3), 684–701. <https://doi.org/10.1007/s11747-024-01044-7>
- Dahl, D. W., & Moreau, P. (2002). The Influence and Value of Analogical Thinking during New Product Ideation. *Journal of Marketing Research*, 39(1), 47–60. <https://doi.org/10.1509/jmkr.39.1.47.18930>
- Drazin, R. (1991). The processes of technological innovation. *The Journal of Technology Transfer*, 16(1), 45–46. <https://doi.org/10.1007/BF02371446>
- Feuerriegel, S., Hartmann, J., Janiesch, C., & Zschech, P. (2024). Generative AI. *Business & Information Systems Engineering*, 66(1), 111–126. <https://doi.org/10.1007/s12599-023-00834-7>
- Glickman, M., & Sharot, T. (2024). How human–AI feedback loops alter human perceptual, emotional and social judgements. *Nature Human Behaviour*, 9(2), 345–359. <https://doi.org/10.1038/s41562-024-02077-2>
- Grewal, D., Roggeveen, A. L., Sisodia, R., & Nordfält, J. (2017). Enhancing Customer Engagement Through Consciousness. *Journal of Retailing*, 93(1), 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.jretai.2016.12.001>
- Heringer, L. (2024). *Case Study: L'Oréal. How L'Oréal Teams with Revuze to Fast-Track Decisions and Time to Market*. https://www.revuze.it/case_studies/loreal/
- Jakesch, M., French, M., Ma, X., Hancock, J. T., & Naaman, M. (2019). AI-Mediated Communication: How the Perception that Profile Text was Written by AI Affects Trustworthiness. *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–13. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300469>
- Karinshak, E., Liu, S. X., Park, J. S., & Hancock, J. T. (2023). Working with AI to persuade: Examining a large language model's ability to generate pro-vaccination messages. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 1–29.
- Kshetri, Nir. Cybersecurity management: an organizational and strategic approach. University of Toronto Press, 2021.
- Kshetri, N., Dwivedi, Y. K., Davenport, T. H., & Panteli, N. (2023). Generative artificial intelligence in marketing: Applications, opportunities, challenges, and research agenda. *International Journal of Information Management*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102716>
- Liu, Y., Mittal, A., Yang, D., & Bruckman, A. (2022). Will AI Console Me when I Lose my Pet? Understanding Perceptions of AI-Mediated Email Writing. *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–13. <https://doi.org/10.1145/3491102.3517731>
- Lu, X., Wijayarathna, K., Huang, Y., & Qiu, A. (2022). AI-Enabled Opportunities and Transformation Challenges for SMEs in the Post-pandemic Era: A Review and Research Agenda. *Frontiers in Public Health*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.885067>
- Luo, L., & Toubia, O. (2015). Improving Online Idea Generation Platforms and Customizing the Task Structure on the Basis of Consumers' Domain-Specific Knowledge. *Journal of Marketing*, 79(5), 100–114. <https://doi.org/10.1509/jm.13.0212>
- Mapila, K., & Moloi, T. (2024). Exploring the Adoption of AI for Customer Engagement Marketing by Small and Medium Enterprises in South Africa: A Literature Review of Challenges and Opportunities. In *AI in Business and Economics*. <https://doi.org/10.1515/9783110790320-014>
- Maroufkhani, P., Iranmanesh, M., & Ghobakhloo, M. (2022). Determinants of big data analytics adoption

- in small and medium- sized enterprises (SMEs). *Industrial Management & Data Systems, ahead-of-print*. <https://doi.org/10.1108/IMDS-11-2021-0695>
- Meinke, L., Girotra, K., Nave, G., Terwiesch, C., & Ulrich, K. T. (2024). *Using Large Language Models for Idea Generation in Innovation* (SSRN Scholarly Paper No. 4526071). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4526071>
- Nanayakkara, S. (2020, November 19). *Application of Artificial Intelligence in Marketing Mix: A Conceptual Review*. Proceedings of the International Conference on Business & Information 2020. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3862936>
- Oldemeyer, L., Jede, A., & Teuteberg, F. (2025). Investigation of artificial intelligence in SMEs: A systematic review of the state of the art and the main implementation challenges. *Management Review Quarterly*, 75(2), 1185–1227. <https://doi.org/10.1007/s11301-024-00405-4>
- Oliveira, T., & Martins, M. R. O. (2011). Literature Review of Information Technology Adoption Models at Firm Level. 14 (1). https://www.researchgate.net/publication/258821009_Literature_Review_of_Information_Technology_Adoption_Models_at_Firm_Level
- Radhakrishnan, J., & Chattopadhyay, M. (2020). Determinants and Barriers of Artificial Intelligence Adoption – A Literature Review. In S. K. Sharma, Y. K. Dwivedi, B. Metri, & N. P. Rana (Hrsg.), *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64849-7_9
- Sahebi, S., & Formosa, P. (2025). The AI-mediated communication dilemma: Epistemic trust, social media, and the challenge of generative artificial intelligence. *Synthese*, 205(3), 128. <https://doi.org/10.1007/s11229-025-04963-2>
- Sithole, S. S., & Ruhode, E. (2021). *Cloud Computing Adoption: Opportunities and Challenges for Small, Medium and Micro Enterprises in South Africa*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.10079>
- Statista. (2025). *Global adoption of generative artificial intelligence (AI) across industries in 2024, by function*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1607179/genai-adoption-across-industries-and-functions/>
- Tornatzky, L. G., Fleischer, M., & Chakrabarti, A. K. (1990). *The Processes of Technological Innovation*. Lexington Books.
- Verordnung (EU) 2024/1689 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für künstliche Intelligenz und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 300/2008, (EU) Nr. 167/2013, (EU) Nr. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 und (EU) 2019/2144 sowie der Richtlinien 2014/90/EU, (EU) 2016/797 und (EU) 2020/1828 (Verordnung über künstliche Intelligenz) (Text von Bedeutung für den EWR) (2024). <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj/deu>
- Von Hoffman, C. (2023). *Popularity of generative AI in marketing U.S. 2023*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1388390/generative-ai-usage-marketing/>
- Xia, L., Sun, Y., Liang, C., Zhang, L., Imran, M. A., & Niyato, D. (2024). *Generative AI for Semantic Communication: Architecture, Challenges, and Outlook*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.15483>
- Zhu, K., Kraemer, K. L., & Xu, S. (2006). The Process of Innovation Assimilation by Firms in Different Countries: A Technology Diffusion Perspective on E-Business. *Management Science*. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1050.0487>

7 Anhang

Tabelle 2

Chancen bei der Anwendung von GenAI im Marketing.

TOE-Faktoren	Chancen	Quellen
Technologische Faktoren	Benutzerfreundlichkeit	Cillo & Rubera (2024)
	Verarbeitung verschiedener Datentypen und hohe Skalierbarkeit	Cillo & Rubera (2024)
	Selbstständige Verbesserung des GenAI-Tools (und des Marketings) durch mehr Daten	Kshetri et al. (2023)
Organisatorische Faktoren	Unterstützung bei der Erstellung und Vermarktung von Marketing-Inhalten	Cillo & Rubera (2024); Kshetri et al. (2023)
	Reduzierter Zeit-, Personal- und Kostenaufwand	Cillo & Rubera (2024)
	Steigerung von Effektivität, Produktivität und Shareholder Value	Cillo & Rubera (2024); Kshetri et al. (2023)
	Ideen- und Kreativitätsförderung	Cillo & Rubera (2024); Kshetri et al. (2023)
	Verbesserte Datenanalysen und -verständnis	Cillo & Rubera (2024); Kshetri et al. (2023); Sahebi und Formosa (2025)
Umweltfaktoren	Empathische, zeitnahe, relevante und personalisierte Marketinginhalte	Cillo & Rubera (2024); Kshetri et al. (2023)
	Positive Auswirkungen auf Logik, Authentizität	Cillo & Rubera (2024)
	Verbesserung von Erlebnis für die Kundschaft und Loyalität der Kundinnen und Kunden	Kshetri et al. (2023)
	Erhöhte Kaufbereitschaft	Cillo & Rubera (2024)

Tabelle 3

Herausforderungen bei der Anwendung von GenAI im Marketing.

TOE-Faktoren	Herausforderungen	Quellen
Technologische Faktoren	Fehleranfälligkeit	Cillo & Rubera (2024); Sahebi und Formosa (2025)
	Einhaltung des Datenschutzes	Cillo & Rubera (2024); Kshetri et al. (2023)
	Hohe Komplexität	Cillo & Rubera (2024); Kshetri et al. (2023)
Organisatorische Faktoren	Hohe Kosten (Anpassung, Einarbeitung, Fehlerkorrektur)	Cillo & Rubera (2024), Kshetri et al. (2023)
	Misstrauen der Mitarbeitenden	Kshetri et al. (2023)
	Eingeschränkte menschliche Kreativität	Cillo & Rubera (2024)
Umweltfaktoren	Misstrauen und reduzierte Wahrnehmung von Authentizität, Verantwortung, Kreativität, Kompetenz und Vertrauen (bei KI-Kennzeichnung)	Cillo & Rubera (2024); Sahebi und Formosa (2025)
	Datenschutzbedenken	Cillo & Rubera (2024); Kshetri et al. (2023)
	Technologisierte Kundenbindung, fehlender menschlicher Kontakt	Cillo & Rubera (2024)

Metrology 4.0 and its central role in Industry 4.0

A brief review

Flaviana Tagliaferri, Michael Kuhl, René Pleul

Contact: Flaviana Tagliaferri, Hochschule Mittweida, flaviana.tagliaferri@hs-mittweida.de

Abstract

Metrology 4.0 embeds metrological methods into smart manufacturing environments, using connected devices, automated workflows, and streaming data analytics to inform production decisions. Its enabling technologies include networked sensors, machine learning and AI, digital twin models, and cloud-native services that underpin measurement workflows. The transition to digital metrology introduces new benefits—including real-time quality control, improved productivity, collaborative innovation, and reduced costs—while also presenting challenges related to data security, interoperability, and model transparency. Digital metrology's maturation supports smart factory operations and could play an important role in the transition to Industry 5.0, which prioritizes collaboration and trust.

Keywords: Metrology 4.0, Industry 4.0.

1 Introduction

Metrology 4.0 refers to the application of metrological principles within the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0), where digital technologies reshape manufacturing practices. The evolution of metrology from the third to the fourth industrial revolution is a profound paradigm shift, characterized by digitalization, the integration of measurement systems into real-time production processes, and the intensive use of advanced technologies (Wieczorowski & Trojanowska, 2021). This evolution is based on the need to maintain maximum accuracy and traceability of the International System (SI) in a highly interconnected industrial environment. Rather than serving only quality control, metrology in Industry 4.0 now produces data flows that inform the whole manufacturing lifecycle.

2 The Foundations and Role of Metrology

Metrology serves as the foundation of measurement science and is the cornerstone of data reliability. European metrology is coordinated through collaboration between national metrology institutes (NMIs), and EU-level bodies, with the support of the European Commission. The central body facilitating this coordination and metrology research in Europe is the European Association of National Metrology Institutes (Euramet). The most influential National Metrology Institutes (NMIs) in Europe, such as the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Germany and the National Physical Laboratory (NPL) in the United Kingdom, have developed digitalization strategies that guide the European direction. For example, a

pan-European consortium led by the PTB has initiated the development of a coordinated European Digital Quality Infrastructure (DQI) for new services and products, called the "European Metrology Cloud" (EMC). In this context, the term "cloud" refers to a distributed trusted metrology platform. Therefore, metrology at the European level is coordinated by Euramet for research and collaborative initiatives, with the PTB playing a strategic leadership role in the development of the digital infrastructure (EMC) in line with European Union regulations and global standards. Indeed, even at the global level, digital metrology is coordinated by bodies that directly influence European practice: this is the case with the International Committee for Weights and Measures (CIPM) that, in 2019, established a Digital-SI Task Group to develop a coordinated, uniform, authoritative, and reliable framework for data exchange based on the International System of Units (SI) (Thiel et al., 2017), (Euramet, M., 2022).

Traditional metrology focuses on accuracy and uncertainty assessment, aspects that remain essential even in the new scenario. National and international bodies guarantee metrological traceability according to shared criteria, ensuring the equivalence of calibration certificates worldwide. The breadth of metrological fields traditionally covered with the goal of maximum accuracy is well known: dimensional measurements (from nanometrology to long distances), thermometry (based on the International Temperature Scale ITS-90), mass and related quantities (force, pressure, hardness), and electromagnetic measurements (DC, AC, high voltage, radio frequency), the creation of the unit of time and frequency, etc..

3 Metrology Evolution Towards the 4th Revolution (Metrology 4.0)

The Fourth Industrial Revolution is a deep change, made possible by developments in metrology. Metrology now increasingly functions as a continuous production-level feedback mechanism rather than a separate after-the-fact inspection step.

3.1 New Requirements and Objectives

Industry 4.0 measurement systems must meet tight requirements — for instance, enabling calibration approaches that avoid production stoppages

Integration and Automation: Measurement must be seamlessly integrated into the production line and must aim for 100% product inspection, rather than just random sampling.

Real-Time Data: Measurement data must be provided in real time with the lowest possible uncertainty, in a format

that can be processed and transmitted throughout the entire process, from the sensor to the cloud.

Waste and Cost Reduction: The goal is to maximize efficiency, reduce downtime, and optimize maintenance.

3.2 Enabling Technologies (for Industry 4.0) and Metrology

Metrology 4.0 is intrinsically linked to the main technologies of Digital Transformation, which require real-time, secure, and traceable measurements. The evolution of metrology is crucial, as it provides the tools for the objective knowledge needed to make informed decisions and implement the transformation of a factory into a "smart factory". A wide range of technologies and tools are the pillars of this transformation.

3.2.1 Internet of Things (IoT) and Industrial IoT (IIoT)

IIoT adapts general IoT concepts for manufacturing: networks of sensors and devices collect streaming data for monitoring, optimization, and logistics planning. Metrology is central to IIoT systems. An example of this is the European SmartCom project, which is dedicated to defining the methodological and technical foundations for universal, secure, and unambiguous communication of metrological data in IoT and Industry 4.0 contexts (Barbosa et al., 2022), (Tagliaferri & Kuhl, 2024). Key elements are:

1. **Hardware Components and Edge Computing:** IIoT systems consist of an integrated network of devices that connect the enterprise ecosystem, including sensors, actuators, controllers, gateways, network switches, and industrial PCs (IPCs). These edge devices collect, process, and transmit data. Edge computing processes data close to its source to minimize latency and reduce network loads, which is critical for time-sensitive tasks like predictive maintenance.
2. **Communication and Protocols:** Specific connectivity protocols are used to ensure a continuous and secure flow of information between devices

3.2.2 Digital Twin (DT)

A DT is a dynamic virtual model of a physical asset or process; continuous measurement streams supply the data that update and validate twin behaviour. In other words, DTs use real-time measurements to mirror physical systems, enabling simulation and anomaly detection (Jiang et al., 2021), (Gohari et al., 2019). DT is a virtual model that faithfully represents a real product or process and is considered a cornerstone of Industry 4.0. Cyber-physical measurement systems and their data serve as an interface between the real production environment and its virtual representation. Real-time measurement data is the "material that digital twins are made of". DT also allows for performance monitoring, progress optimization, results simulation, and prediction of potential anomalies or failures. Using DT significantly reduces wasted time and resources.

3.2.3 Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML)

AI and ML are integrated to manage massive amounts of data and identify complex patterns. Applications include predictive analysis of instrument degradation, calibration plans optimization, and automated calibration. However, in metrology, deterministic algorithms and interpretable models (such as linear regression or decision trees) are preferred to ensure the repeatability, stability, and verifiability of results, which are essential for the validity of measurement processes. Self-learning models (such as deep learning) have fewer direct applications where maximum metrological transparency is required. AI and ML are essential for managing the large amounts of data (big data) generated in Metrology 4.0 (Wieczorowski & Trojanowska, 2021), (Varshney et al., 2022).

AI is used for predictive instrument analysis (to prevent deviations from specifications), calibration plan optimization, and automated calibration. AI can also support users in making decisions quickly and efficiently, leveraging data from the knowledge base (Wieczorowski & Trojanowska, 2021).

Despite the usefulness of machine learning, which allows systems to learn autonomously from data, metrology requires stability, repeatability, and verifiability. For this reason, deterministic algorithms and interpretable models (which produce understandable and verifiable results) are preferred over less transparent self-learning models such as deep learning.

3.2.4 Digitalization of Metrology Services and Safety

Digital transformation requires standardized tools and infrastructure to ensure data traceability and security. This includes defining minimum requirements for the exchange of machine-readable data in digital communication.

4 Strategic Areas - Focal Points

The evolution of metrology toward Industry 4.0 requires an internationally coordinated strategy to manage the integration of measurement into cyber-physical systems and the digital ecosystem (Sousa & Almeida, 2021).

The most influential approach to metrology digitalization is the strategy formulated by the PTB, the German NMI, in 2017, which is implemented through several projects focusing on four strategic focal points. (Barbosa et al., 2022), (Eichstädt, 2017).

These focal points represent the research and development agenda that many NMIs are addressing to create a Digital Quality Infrastructure (DQI) that ensures the traceability and reliability of measurements in the digital environment.

4.1 Focal Point 1 (FP1): Digital Transformation of Metrology Services

FP1 focuses on the digital upgrade of quality infrastructure and legal metrology. The digital transformation of metrology services creates value by extending previously unavailable capabilities, removing barriers to cross-border

e-commerce, and improving consumer protection (Gadelrab & Abouhogail, 2021), (Eichstädt, 2017), (Varshney et al. 2021). Key domains of FP1 include:

- Digital Calibration Certificates (DCCs): DCCs are intended to replace paper-based calibration certificates (PCCs) and require a secure digital infrastructure for authentication, validation, and complete traceability of the metrological chain back to primary samples (Mustapää et al., 2020), (Brown et al., 2020).
- Digital Representation of Metrological Traceability: Metrology 4.0 requires standardized, machine-readable formats to represent physical quantities, units of measurement, and, crucially, measurement results, including deviations and uncertainty components (Barbosa et al., 2022).
- Digitalization of the Quality and Legal Metrology Infrastructure: The goal is to develop reference architectures and establish a metrology cloud (such as the European Metrology Cloud - EMC) to support conformity assessment and market surveillance processes. The use of blockchain-based technologies is strongly emphasized for their ability to ensure integrity and traceability up to the highest level of the metrological chain (Oppermann et al., 2020), (Softicet et al., 2021).

4.2 Focal Point 2 (FP2): Metrology in Big Data Analysis

FP2 focuses on the development of metrological analytical methods to manage, archive, and ensure the security and reliability of large amounts of data (Big Data). Digital measurements generate a massive amount of data that must be transformed into strategic information (Gadelrab & Abouhogail, 2021). Key domains of FP2 include:

- Metrological Traceability in the IoT: It is essential to integrate metrological principles (SI traceability and uncertainty assessment) into the IoT data lifecycle, especially considering heterogeneous and rapidly evolving sensor networks.
- Use of AI, Machine Learning, Digital Twins, and Cloud Computing: Metrology in this context is central to predictive maintenance. AI and machine learning are used to analyze data, identify patterns, and optimize processes (such as calibration plans or automated calibration). Digital Twin relies on data from cyber-physical measurement systems as an interface between physical reality and virtual representation.
- Cyber-Physical Systems (CPS): CPS, often integrated with IoT and cloud computing to form cyber-physical manufacturing measurement systems (CPMM), aim to create factories with increasing intelligence and self-adaptation.

4.3 Focal Point 3 (FP3): Metrology of Communication Systems for Digitalization

This strategic point addresses the need to metrologically validate and ensure the security and efficiency of communication in complex industrial scenarios (Ačko et al., 2020). Key domains of FP3 include:

- Data-Driven Metrology Infrastructure: Requirements for machine-readable data exchange in digital communication must be defined. The European SmartCom project aims to provide methodological and technical foundations for universal, unambiguous, and secure communication of metrological data in IoT and Industry 4.0 networks.
- Integration of IoT, CPS, and Cloud Computing: These elements are designed to maximize efficiency and develop new services. The PTB, for example, has promoted the European Metrology Cloud (EMC) as a distributed, trusted platform to support compliance processes.
- Data Security and IIoT: Interconnection between devices increases vulnerabilities. Customized security solutions are needed for the IIoT value chain. The implementation of an inter-NMI blockchain network (such as the joint initiative between PTB and Inmetro in Brazil) is being addressed to connect NMIs globally and ensure the integrity and authenticity of legal information.

4.4 Focal Point 4 (FP4): Metrology for Simulations and Virtual Measuring Instruments

FP4 is dedicated to the development of analytical methods and licensing procedures for virtualized and interconnected measuring systems, as well as for the simulation of complex measurements for automated process control. The key domains of FP4 include:

- Virtual Metrology (VM) and Automatic Virtual Metrology (AVM): VM/AVM focuses on product quality estimation. Although originally developed for semiconductor manufacturing, it can be adapted to other industries adopting Industry 4.0. VM aims to achieve a faster and more reliable classification scheme for parts produced online and in real time (Chien et al., (2022).
- Deep Learning (DL) Integration: DL is used in virtual metrology contexts, especially for semi-automatic feature extraction and defect identification in large volumes of data.
- Augmented Reality (AR): AR is applied to automate and accelerate quality assurance tasks. For example, AR can assist operators in verifying component conformity in real time.
- The strategic areas do not simply digitize existing services but redefine the role of metrology, trans-

forming it into a dynamic, data-driven infrastructure that enables key Industry 4.0 technologies (such as AI, IoT, and Digital Twin). This strategy ensures that the fundamentals of metrology (accuracy and traceability) are maintained and promoted in a highly connected and automated manufacturing ecosystem.

5 Risks and Challenges

The integration of Metrology 4.0 with Industry 4.0 and the IIoT represents a revolution based on digitalization and real-time data analytics. While this offers enormous advantages in terms of efficiency, automation, and predictive maintenance, sources highlight a series of critical risks and challenges that must be addressed to ensure the credibility and reliability of digital measurements.

5.1 Risks Related to Cybersecurity and Data Integrity.

The greatest threat in the interconnected digital environment is data and infrastructure security, which is a top priority.

Cybersecurity as a Main Barrier: Digital transformation inevitably entails data security risks; therefore, it brings issues such as cybersecurity, data encryption, data storage, and secure communication. Stakeholders repeatedly identify cybersecurity, including data integrity and secure communication, as a principal barrier to IIoT deployment in metrology.

Increased Vulnerabilities: The interconnection between devices, machinery, and systems increases efficiency, but at the same time, exposes the infrastructure to potential attacks. Such attacks can manifest unauthorized access, operational disruptions, or data manipulation.

Data Manipulation: There is an inherent risk in maintaining the integrity and confidentiality of digitally stored data. Data manipulation or alteration is possible. Because measurements are critical, even a small error in a measurement can compromise product quality and cause financial losses.

Blockchain Reliability: Although blockchain technology is seen as a reliable solution for ensuring the integrity and authenticity of metrological data, its implementation must overcome challenges related to the large amount of data, privacy, and oracle authentication.

5.2 Metrology Challenges in Data Analytics (AI/ML)

The introduction of AI and ML involves a trade-off between the flexibility of big data analysis and the fundamental requirements of metrology.

Stability and Repeatability: The adoption of AI must address the challenge of ensuring stability, repeatability, and verifiability of results, which are crucial for the validity of measurement processes.

Non-Interpretable Models: The most complex and self-learning models, such as those based on DL and Natural Language Processing (NLP), while powerful, do not offer the stability and repeatability required for metrology. Their results can vary from one run to the next, making it difficult to document a standard metrology process. For

this reason, metrology tends to favor deterministic algorithms and interpretable models (such as Linear Regression or Decision Trees).

Big Data Challenges: The challenges for data analysis in a data-driven industrial approach are classified into four main groups: data size, the choice of DL models, the nature of the data, and the uncertainty associated with DL models generated at laboratory scale.

Digital Representation of Uncertainty: Digitalization requires a new approach to the digital representation of measurement uncertainty. Reporting formats should include uncertainty components, which are not in line with current practices, but are necessary for digital systems to use this information in end-use applications.

5.3 Technical and Interoperability Challenges

The implementation of IIoT and Metrology 4.0 in a heterogeneous industrial context raises issues of integration and the technical performance of sensors.

Interoperability and Integration Costs: Industrial infrastructures often use devices and systems from different manufacturers, each with different standards, languages, and protocols. This lack of uniform compatibility can hinder the full functionality of IIoT systems and increase integration costs.

Unreliable Connectivity: All IoT devices and equipment require a stable and reliable connection to function properly. Service interruptions can compromise operational efficiency. In the IIoT scenario, the inherent reliability and predictability of wireless connections (used in mobile or wide-area scenarios) remain extremely challenging.

Limitations of Measurement Methods: Metrology 4.0 systems impose stringent requirements. For example, optical measurements (which generate large amounts of data) require almost perfect surface cleanliness and are sensitive to external factors. Conversely, tactile metrology is slow due to the need for mechanical contact and can damage sensitive objects.

Privacy and Big Data Management: IIoT systems generate enormous volumes of data.

5.4 Organizational and Strategic Challenges

The adoption of digital transformation is not just a technological issue, but also a strategic and organizational one. **High Failure Rates:** Despite the numerous benefits, some research reports a high failure rate associated with the implementation of digital transformation.

Need for Strategy: The success of digitalization depends on its strategic adoption within the organization.

Trust and Transparency: It is essential to ensure transparency in the use of collected information and define clear responsibilities to ensure ethical use and earn the trust of companies.

6 Benefits and Outlook

Metrology 4.0, integrating accurate and reliable measurements with real-time data analysis, is radically transforming manufacturing processes. Benefits include productivity gains and lower operating costs: automated calibration

scheduling and continuous monitoring permit interventions only when indicators suggest deviation.

Improved quality: the implementation of intelligent and adaptive quality strategies ensures batch consistency and reduces raw material waste.

Collaborative innovation: Metrology 4.0 enables innovative and personalized actions thanks to increasingly collaborative conclusions in the decision-making process.

7 Conclusions

Metrology 4.0 represents a technological revolution powered by Industry 4.0. It is dynamically and automatically integrated into the manufacturing process. The primary objective is to provide real-time data for continuous quality control and optimization. This evolution is constant, driven by research into new technologies, methods, and techniques aimed at improving various aspects, such as reducing costs, increasing quality, and reducing waste. Looking to the future, the evolution towards Industry 5.0 promises further improvements, placing greater emphasis on human-machine collaboration to ensure even higher levels of traceability, repeatability, and reproducibility. In conclusion, the digitalization of metrology is serving as an essential knowledge input for the production system, assuming a crucial role in decision-making processes and ensuring the success of production lines. Metrology 4.0 integrates measurement data into decision workflows and acts as a bridge between physical production and its virtual representations, enabling data-driven optimization.

References

- Ačko, B., Weber, H., Hutzschenreuter, D., & Smith, I. (2020). Communication and validation of metrological smart data in IoT-networks. *Advances in Production Engineering & Management*, 15(1). <https://doi.org/10.14743/apem2020.1.353>
- Barbosa, C. R. H., Sousa, M. C., Almeida, M. F. L., & Calili, R. F. (2022). Smart manufacturing and digitalization of metrology: A systematic literature review and a research agenda. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(16), 6114. <https://doi.org/10.3390/s22166114>
- Brown, C., Elo, T., Hovhannisyan, K., Hutzschenreuter, D., Kuosmanen, P., Maennel, O., Mustapaa, T., Nikander, P., & Wiedenhoefer, T. (2020). Infrastructure for digital calibration certificates. In *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT* (pp. 485-489). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138220>
- Chien, C. F., Hung, W. T., Pan, C. W., & Van Nguyen, T. H. (2022). Decision-based virtual metrology for advanced process control to empower smart production and an empirical study for semiconductor manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108245. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108245>
- Eichstädt, S. (2017). Ptb digitalization strategy. *Metrologie für die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft*, 41. <https://oar.ptb.de/re-sources/show/10.7795/120.20210223>
- EURAMET, M. (2022). European metrology programme for innovation and research (EMPIR). URL: <http://msu.euramet.org/calls.html>.
- Gadelrab, M. S., & Abouhoggail, R. A. (2021). Towards a new generation of digital calibration certificate: Analysis and survey. *Measurement*, 181, 109611. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109611>
- Gohari, H., Berry, C., & Barari, A. (2019). A digital twin for integrated inspection system in digital manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 52(10), 182-187.
- Gohari, H., Berry, C., & Barari, A. (2019). A digital twin for integrated inspection system in digital manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 52(10), 182-187.
- Jiang, Y., Yin, S., Li, K., Luo, H., & Kaynak, O. (2021). Industrial applications of digital twins. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379(2207), 1-15. <https://www.jstor.org/stable/27100809>
- Mustapää, T., Nikander, P., Hutzschenreuter, D., & Viitala, R. (2020). Metrological Challenges in Collaborative Sensing: Applicability of Digital Calibration Certificates. *Sensors*, 20(17), 4730. <https://doi.org/10.3390/s20174730>
- Oppermann, A., Eickelberg, S., & Exner, J. (2020). Toward digital transformation of processes in legal metrology for weighing instruments. In *2020 15th Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)* (pp. 559-562). IEEE. <https://doi.org/10.15439/2020F77>
- Sadaoui, S. E., Mehdi-Souzani, C., & Lartigue, C. (2022). Multisensor data processing in dimensional metrology for collaborative measurement of a laser plane sensor combined to a touch probe. *Measurement*, 188, 110395. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110395>
- Softic, A., Uzunovic, N. Z., & Lemes, S. (2021). BLOCKCHAIN-BASED METROLOGICAL TRACEABILITY. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 32. <https://doi.org/10.2507/32nd.daaam.proceedings.075>
- Sousa, M. C., & Almeida, M. F. L. (2021). Smart revolution and metrology: A longitudinal science mapping approach. *Measurement: Sensors*, 18, 100340. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100340>
- Tagliaferri, F., & Kuhl, M. (2025). Understanding the transition from Industry 4.0 to Industry 5.0: a brief orientation guide. *NextGen Scientific Review*, (3), 52-57. <https://doi.org/10.48446/opus-15905>
- Thiel, F., Esche, M., Toro, F. G., Oppermann, A., Wetzlich, J., & Peters, D. (2017). The European metrology cloud. In *18th International Congress of Metrology* (p. 09001). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/metrology/201709001>

- Varshney, A., Garg, N., Nagla, K. S., Nair, T. S., Jaiswal, S. K., Yadav, S., & Aswal, D. K. (2021). Challenges in Sensors Technology for Industry 4.0 for Futuristic Metrological Applications: A. Varshney et al. *Mapan*, 36, 215–226 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s12647-021-00453-1>
- Varshney, A., Garg, N., Jaiswal, S. K., & Yadav, S. (2022). Role of digital transformation in metrology for industrial growth of country. In *IMEKO TC6 international conference on metrology and digital transformation, Berlin, Germany*.
<https://www.imeko.org/publications/tc6-2022/IMEKO-TC6-2022-011.pdf>
- Wieczorowski, M., Kucharski, D., Sniatala, P., Krolczyk, G., Pawlus, P., & Gapinski, B. (2021). Theoretical considerations on application of artificial intelligence in coordinate metrology. In *2021 6th International Conference on Nanotechnology for Instrumentation and Measurement (NanofIM)* (pp. 1-4). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/NanofIM54124.2021.9737344>
- Wieczorowski, M. & Trojanowska, J. (2023). Towards Metrology 4.0 in Dimensional Measurements. *Journal of Machine Engineering*, 23(1), 100–113.
<https://doi.org/10.36897/jme/161717>

2

Interdisziplinäre Gastbeiträge

Ökonomische Entwicklungspotenziale im Fußballstadion der Zukunft

Zur Rolle von Zielgruppenstrategien, Digitalisierung und nachhaltigen Nutzungskonzepten

Chris Alexander Braunstein

Kontakt: Dr. Chris Alexander Braunstein, Campus M University, chris.braunstein@campus-m-university.de

Zusammenfassung

Dieser Artikel analysiert zentrale ökonomische Entwicklungsstrategien moderner Fußballstadien und zeigt auf, wie durch eine integrative Kombination aus Zielgruppenorientierung, Digitalisierung und nachhaltiger Mantel-nutzung neue Ertragsquellen erschlossen werden können. Ziel des Beitrags ist es, zentrale ökonomische Erkenntnisse zur zukünftigen Ausrichtung von Stadioninfrastrukturen herauszuarbeiten und diese in den aktuellen fachlichen Diskurs einzuordnen. Die Grundlage dafür bildet eine qualitative Untersuchung. Im Verlauf der Studie wurden insgesamt 14 Expert:innen aus den Bereichen Digitalisierung, Architektur, Ökonomie, Ökologie sowie sozialer Verantwortung befragt. Für den vorliegenden Artikel wurden daraus gezielt Befunde zum Themenfeld „Ökonomie“ abgeleitet und mithilfe einschlägiger Fachliteratur kontextualisiert. Die differenzierte Ansprache heterogener Besucher:innensegmente mittels Persona-Analysen bildet eine zentrale Grundlage für maßgeschneiderte Angebote. Digitalisierung dient dabei nicht nur der Effizienzsteigerung entlang der Customer Journey, sondern eröffnet innovative Umsatzpotenziale – etwa durch In-App-Bestellungen, Sitzplatzlieferrung oder datengetriebenes Merchandising. Der Pro-Kopf-Umsatz wird als betriebswirtschaftliche Schlüsselkennzahl herausgestellt, deren Steigerung durch ein Zusammenspiel digitaler, gastronomischer und logistischer Maßnahmen erfolgt. Ergänzend dazu gewinnt die Nutzung des Stadions als ganzjährig bespielbare, multifunktionale Venue an Relevanz – etwa für Events, Arbeitsräume oder Freizeitangebote. Die Analyse zeigt: Die wirtschaftliche Zukunftsfähigkeit von Stadien hängt maßgeblich von ihrer Transformation zu vernetzten Erlebnis-, Wirtschafts- und Sozialräumen ab.

Keywords: Fußballstadion der Zukunft, Digitalisierung, Zielgruppenmarketing, Ökonomie.

1 Einführung

Fußballstadien stehen heute an der Schnittstelle von Sport, Wirtschaft und urbaner Entwicklung. Längst übersteigt ihre Bedeutung den ursprünglichen Zweck als reine Austragungsorte sportlicher Wettbewerbe. Infolge gestiegener wirtschaftlicher Anforderungen, intensiver Konkurrenz um mediale Aufmerksamkeit und fortschreitender Technologisierung sind Stadien zunehmend als betriebswirtschaftliche Assets zu begreifen, deren nachhaltige Rentabilität eine strategisch gesteuerte Mehrfachnutzung, differenzierte Ertragsmodelle und eine präzise Zielgruppenansprache voraussetzt. Diese Entwicklung spiegelt einen grundlegenden Paradigmenwechsel wider: vom Stadion als monofunktionale Infrastruktur hin zum Stadion

als multifunktionaler Erlebnis-, Wirtschafts- und Sozialraum. Im Berichtszeitraum der Saison 2023/24 erzielte die deutsche Bundesliga Werbeerlöse in Höhe von 1,018 Milliarden Euro, was einem Anteil von 21,2 Prozent am Gesamtumsatz von 4,80 Milliarden Euro entspricht (DFL Wirtschaftsbericht, 2023). Im Vergleich zur Vorsaison 2022/23, in der die Werbeeinnahmen bei 1,125 Milliarden Euro lagen (25,3 Prozent des Gesamtumsatzes von 4,45 Milliarden Euro), bedeutet dies einen Rückgang sowohl absolut als auch prozentual (DFL Wirtschaftsbericht, 2024). Vor dem Hintergrund schwankender Werbeerlöse rücken neue Wertschöpfungspotenziale in und um das Stadion in den Mittelpunkt ökonomischer Betrachtungen. Dazu zählen unter anderem die konsequente Digitalisierung der Customer Journey und die personalisierte Monetarisierung heterogener Besucher:innensegmente.

Die Zahl der abgesetzten Tickets der 36 Profi-Clubs erreichte in der abgelaufenen Saison 2023/24 mit insgesamt 20.737.276 den bisher höchsten Wert in der Geschichte. Damit wurde der Rekord aus der Vorsaison (19.755.465) um fast fünf Prozent übertroffen. Mit durchschnittlich 33.885 abgesetzten Tickets pro Spiel stellte der Lizenzfußball außerdem einen Rekord beim Zuschauerschnitt auf (DFL Wirtschaftsbericht, 2023).

Es lässt sich ableiten, dass der Pro-Kopf-Umsatz zunehmend als betriebswirtschaftliche Steuerungsgröße an Bedeutung gewinnt, da er ein direktes Maß für die wirtschaftliche Effizienz der Zuschauer:inneninteraktion darstellt und durch gezielte Maßnahmen entlang der Spieltagserfahrung erheblich beeinflusst werden kann. Die Etablierung neuer Geschäftsmodelle, die Aktivierung brachliegender Potenziale sowie die Schaffung resilienter, langfristig tragfähiger Wertschöpfungsketten bilden somit den Kern einer zukunftsorientierten Stadionökonomie.

2 Methodik und Forschungslücke

Die in diesem Beitrag dargestellten Erkenntnisse entstammen einer qualitativen Studie. Für den vorliegenden Artikel wurden zentrale Befunde zum Themenfeld „Ökonomie“ herausgearbeitet und mithilfe einschlägiger Fachliteratur kontextualisiert. Im Verlauf der Gesamtstudie wurden insgesamt 14 Expert:innen aus den Bereichen Digitalisierung, Architektur, Ökonomie, Ökologie sowie sozialer Verantwortung befragt. Ihre Aussagen beruhen auf individuellen Erfahrungswerten und fachlichen Einschätzungen und ermöglichen dadurch eine differenzierte Analyse des untersuchten Themenkomplexes. Die Interviews stellten die primäre Datenbasis der qualitativen Erhebung dar und trugen maßgeblich zur Generierung neuer Erkenntnisse bei. Die Auswertung der Interviews erfolgte

nach den Prinzipien der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring.

Die Entscheidung zugunsten leitfadengestützter Expert:inneninterviews gründet sich auf den explorativen Charakter des Forschungsgegenstands. Da bislang nur wenige empirische Studien zur zukünftigen ökonomischen Entwicklung von Fußballstadien vorliegen, bot sich ein hypothesengenerierender Zugang an (Flick et al., 1995; Mayring, 2002). Zudem enthalten weder die Stadionreglements der UEFA noch das Stadionhandbuch der Deutschen Fußball Liga konkrete Anforderungen zur Erzielung weiterführender ökonomischer Mehrwerte. Die Interviews erlaubten fundierte Prognosen hinsichtlich zukünftiger ökonomischer Entwicklungen im Kontext des „Fußballstadions der Zukunft“. Durch die offenen Leitfragen wurde Raum für subjektive Sichtweisen geschaffen, wodurch komplexe Wirklichkeitskonstruktionen der Befragten erfasst werden konnten. Die qualitative Methodik ermöglichte dabei einen Einblick in die Lebensrealitäten und Erfahrungshorizonte zentraler Akteur:innen. Auf diese Weise wurden neben institutionellen Strategien auch implizite Deutungsmuster sichtbar, die für die Formulierung praxisrelevanter Handlungsempfehlungen von Bedeutung sind (Flick et al., 2007).

3 Ergebnisse der empirischen Untersuchung

3.1 Zielgruppenorientierung als Grundlage ökonomischer Diversifizierung

In den 1980er Jahren setzte sich das Stadionpublikum primär aus männlichen Zuschauer:innen zusammen. Im Verlauf der letzten Jahrzehnte ist jedoch eine zunehmende Diversifizierung des Publikums zu beobachten, wobei insbesondere Familien, Frauen und Kinder verstärkt in den Fokus rücken. Durch die gezielte Einrichtung sogenannter Familienblöcke werden diese neuen Zuschauer:innengruppen aktiv integriert. Diese Entwicklung weist auf eine signifikante Erweiterung der Zielgruppe hin und eröffnet folglich neue Potenziale im Bereich des Marketings sowie der Absatzstrategien (Sieweck, 2016). Es lässt sich ableiten, dass die zunehmende Heterogenität der Stadionbesucher:innen aufgrund unterschiedlicher Bedürfnisse und variierender Zahlungsbereitschaft eine differenzierte, zielgruppenspezifische Angebotsgestaltung erfordert.

In den 1990er Jahren entstand der Trend, Sportveranstaltungen gezielt zur Kund:innenbindung und -gewinnung zu nutzen. Unternehmen luden Geschäftspartner:innen zu Events ein, um Beziehungen zu pflegen, neue Kontakte zu knüpfen und ihr Image positiv mit dem Sport zu verknüpfen. Die Vermietung von VIP-Logen sowie der Verkauf von Business-Seats mit Bewirtung brachten neue Einnahmen und wurden zum Standard (Krüger & Dreyer, 2004). Um die ökonomischen Effekte durch VIP-Logen und Hospitality-Bereiche weiter auszubauen, bedarf es neuer Konzepte:

Neben exklusivem Catering und Hospitality-Leistungen werden zunehmend auch Events außerhalb der Spieltage etabliert, um Businesskund:innen langfristig zu binden. In modernen Stadien bieten Hospitality-Suiten Unternehmen

die Möglichkeit, ihre Kund:innen am Spieltag zu empfangen. Mit dem Trend zu hybriden und Remote-Arbeitsmodellen suchen Firmen jedoch nach flexiblen Räumen für Geschäftsmeetings. Eine Umgestaltung der Suiten zu multifunktionalen, exklusiven Meetingräumen kommt sowohl den Unternehmen, die ihren Kund:innen ein einzigartiges Erlebnis bieten können, als auch den Stadionbetreiber:innen zugute, die zusätzliche Einnahmen generieren (KPMG, 2022). Parallel dazu gewinnen familienfreundliche Angebote an Bedeutung. Familienzonen mit kindgerechter Infrastruktur, betreuten Spielbereichen und preislich attraktiven Familientickets tragen zur langfristigen Zuschauer:innenbindung bei.

Der gezielte Ausbau dieser differenzierten Erlebniswelten steigert nicht nur die Zufriedenheit der Kund:innen, sondern auch die durchschnittlichen Ausgaben pro Besuch. Langfristig fördert dies die Resilienz der Vereine gegenüber ökonomischen Schwankungen im Bereich der Werbeeinnahmen und eröffnet neue Erlösströme – sowohl während als auch jenseits des klassischen Spieltageschäfts.

3.2 Digitalisierung als Hebel zur Umsatzsteigerung

Das Konzept des „Connected Stadium“ zielt auf eine umfassende digitale Vernetzung der Stadionumgebung ab, wobei insbesondere nutzergenerierte Inhalte in Echtzeit in das Stadionerlebnis integriert werden. Zentrale Voraussetzung für diese Form der Interaktivität ist eine stabile und leistungsfähige 5G-Internetverbindung. Nutzer:innen erhalten unter anderem Zugriff auf Live-Statistiken, die Teilnahme an interaktiven Formaten wie Umfragen oder Tippspielen sowie die Kommunikation über soziale Netzwerke. Darüber hinaus werden Telekommunikations- und Ausstattungspartner:innen des Vereins unmittelbar in die digitale Infrastruktur eingebunden (Nufer & Zuch, 2015).

Digitale Technologien ermöglichen zudem eine signifikante Effizienz- und Umsatzsteigerung entlang der gesamten Customer Journey im Stadionkontext. Mobile Ticketing, In-App-Ordering, integrierte Payment-Lösungen, personalisierte Angebotsgestaltung sowie datenbasierte Verkaufsoptimierung zählen mittlerweile zum technologischen Standard moderner, digitaler Arenen. Sie bilden die Grundlage für eine nahtlose, individualisierte Nutzer:innenenerfahrung, die sowohl Convenience als auch Umsatzpotenziale maximiert. Darüber hinaus ermöglichen digitale Technologien eine datengestützte Analyse des Fanverhaltens, wodurch sich sowohl individuelle Bedürfnisse besser erfassen als auch Veranstaltungen gezielt optimieren lassen. Die Erhebung, Verarbeitung und Auswertung großer Datenmengen stellt dabei eine zentrale Grundlage dar, um fundierte Erkenntnisse über Präferenzen und Verhaltensmuster der Besucher:innen zu gewinnen. Eine zunehmend bedeutende Rolle spielt in diesem Zusammenhang der Einsatz Künstlicher Intelligenz, die in der Lage ist, umfangreiche Datenströme zu analysieren, Muster zu identifizieren sowie Prognosen zu erstellen. Besonders im Bereich des Crowd Managements kann KI dabei helfen, Auffälligkeiten frühzeitig zu erkennen und entsprechende Maßnahmen abzuleiten (Hellmann et al., 2023).

Die Verbindung aus Standortdaten, Verhaltensmustern und Kaufhistorien schafft die Grundlage für intelligente, algorithmengestützte Angebotssteuerung in Echtzeit. Digitale Plattformen sind zudem essenziell für die integrierte Vermarktung ergänzender Produkte und Dienstleistungen. Dies umfasst nicht nur klassischen Merchandising-Verkauf, sondern auch Erlebnisangebote wie exklusive VIP-Add-ons. Der digitale Point of Sale wird so zum zentralen Interface zwischen Club und Konsument:in, über das Cross-Selling-Potenziale systematisch erschlossen werden können.

3.3 Mantelnutzung: Stadionbetrieb über den Spieltag hinaus

Ein zukunftsweisendes Geschäftsmodell im Sportstättenmanagement basiert auf der Idee, das Stadion zu einer ganzjährig aktivierten, multifunktionalen Venue zu transformieren. Ziel dieser Strategie ist es, unabhängige Ertragsquellen zu schaffen, die die hohe Fixkostenstruktur – insbesondere in den Bereichen Betrieb, Instandhaltung und Personal – kompensieren und gleichzeitig die Auslastung der Arena über den reinen Spieltag hinaus erhöhen. Ein zentraler Bestandteil dieses Modells ist die Diversifikation der Nutzungsmöglichkeiten. Neben den klassischen Veranstaltungen wie Fußballspielen können Stadien zunehmend als Gastgeber für Drittveranstaltungen wie Konzerte, Festivals, Messen oder Firmenfeiern fungieren. Diese Veranstaltungen, die vor allem in den spielfreien Zeiten stattfinden, bieten die Möglichkeit, neue Besucher:innengruppen anzusprechen und zusätzliche Umsätze zu generieren.

Die flexible Gestaltung der Stadioninfrastruktur, etwa durch modulare Elemente, ist dabei ein entscheidender Erfolgsfaktor. Darüber hinaus gewinnen Geschäftsflächen im Stadion zunehmend an Bedeutung. Die Nutzung von Büroflächen oder Co-Working-Spaces in den Business-Bereichen stellt eine Möglichkeit dar, die Arenen auch unter der Woche zu aktivieren. Hierbei entsteht ein innovatives Umfeld, das nicht nur den wirtschaftlichen Erfolg steigert, sondern auch das Image des Vereins als zukunftsorientierten Akteur in der Stadtentwicklung stärkt. Des Weiteren können Schulungs-, Kongress- und Eventräume im Stadion genutzt werden, um Unternehmen, Verbänden oder Bildungseinrichtungen eine Plattform für Veranstaltungen zu bieten. Ein Beispiel hierfür ist das Projekt „Lernort Stadion“, das seit 2009 von der DFL-Stiftung unterstützt wird. Es ermöglicht Schulklassen und Jugendgruppen, für mehrere Tage im Stadion gesellschaftliche Themen zu bearbeiten und dient damit der politischen Bildung junger Menschen. 29 Lernzentren konnten bereits etabliert werden (DFL-Stiftung, 2025).

Die Stadien von morgen werden zudem immer mehr als integrale Bestandteile des urbanen Raums betrachtet. Die Stadionlage wird zunehmend in das städtische Netzwerk eingebunden, das Nahversorgung, Mobilität und Freizeitangebote umfasst. Durch die wirtschaftlichen Aktivitäten des Profifußballs fließen dem Staat – nach Abzug der Kosten – jährlich 3,7 Milliarden Euro zu (Behrenbeck et al., 2020).

So wird das Stadion zu einem urbanen Begegnungsort, der durch seine zentrale Lage zur Förderung der städtischen Infrastruktur beiträgt und einen erheblichen monetären Beitrag leistet. Diese Entwicklung, die das Stadion als „Stadtbaustein“ positioniert, schafft eine ökonomisch nachhaltige sowie sozial anschlussfähige Nutzung, die weit über den Sportbetrieb hinausgeht. Die Entwicklung von Stadien hin zur Integration nicht-sportlicher Nutzungen wie Gastronomie, Einzelhandel oder gesellschaftspolitische Angebote führt zu einer neuen Form hybrider Nutzung. Multifunktionsarenen sind wandelbar und reagieren flexibel auf wechselnde Anforderungen. Damit können sie sowohl kurzfristige als auch langfristige gesellschaftliche Bedürfnisse adressieren (Schroer, 2009). Dadurch wird das Stadion zu einem lebendigen, ganzjährig genutzten Treffpunkt, der für alle Beteiligten – von den Fans über die Stadtbevölkerung bis hin zu Unternehmen – einen Mehrwert schafft.

3.4 Übergeordnetes Ziel: Pro-Kopf-Umsatz als Schlüsselkennzahl wirtschaftlicher Performance

Der Pro-Kopf-Umsatz stellt eine der zentralen betriebswirtschaftlichen Kennzahlen im Stadionmanagement dar und ist ein maßgeblicher Indikator für die wirtschaftliche Effizienz einer Sportstätte. Da dieser Wert direkt mit der Zufriedenheit der Zuschauer:innen und der Attraktivität des gesamten Stadionerlebnisses verknüpft ist, werden verschiedenste Strategien verfolgt, um den Umsatz pro Besucher:in zu steigern. Diese Maßnahmen betreffen sowohl die operative Effizienz als auch die Weiterentwicklung des Serviceangebots und der Produktpalette.

Ein zentraler Hebel zur Steigerung des Pro-Kopf-Umsatzes liegt in der Verkürzung von Wartezeiten. Hier spielen digitale Bestelllösungen eine entscheidende Rolle, die es den Besucher:innen ermöglichen, Speisen, Getränke und Merchandise über mobile Apps oder „in-stadium-Plattformen“ vorab zu bestellen oder direkt an ihren Sitzplatz liefern zu lassen. Optimierte Logistik, wie etwa die Integration von kontaktlosen Zahlungs- und Abholsystemen, reduziert den Bedarf an langen Warteschlangen und sorgt für eine effizientere Nutzung der Stadionressourcen. Durch die Reduzierung von Wartezeiten erhöhen sich die Kund:innenfrequenzen und gleichzeitig die Konsumbereitschaft der Besucher:innen, da der Aufenthalt im Stadion angenehmer und zeiteffizienter gestaltet wird. Das Potenzial des Pro-Kopf-Umsatzes zeigt nachfolgende Analyse: Der VfB Stuttgart erzielte 2024 pro Heimspiel in der MHP-Arena 2,6 Millionen Euro und belegt damit Platz 16 im UEFA-Ranking der Stadioneinnahmen. Nur der FC Bayern (5,7 Millionen Euro, Platz 5) schnitt unter den deutschen Clubs besser ab. Borussia Dortmund erreichte mit 2,2 Millionen Euro knapp Rang 21 – trotz der höchsten Zuschauer:innenzahl Europas, bedingt durch niedrige Ticketpreise von durchschnittlich 27 Euro. Spitzenreiter ist Real Madrid mit 7,4 Millionen Euro (UEFA, 2024).

Neben der Basisversorgung gewinnen exklusive Add-ons zunehmend an Bedeutung. Fanboxen, die personalisierte Merchandise-Produkte oder VIP-Erlebnisse beinhalten, bieten eine Möglichkeit, höhere Umsätze zu erzielen. Dar-

über hinaus können Stadion-Apps als vielseitige Plattformen genutzt werden, um personalisierte Angebote, Gamification-Elemente und Upgrades zu promoten. Immer mehr Fans nutzen technologische Möglichkeiten, um ihr Sporterlebnis zu bereichern – sowohl im Stadion als auch außerhalb. Mit dem technischen Fortschritt steigt die Präferenz für den Zugriff auf Sportinhalte über mobile Endgeräte, Streaming-Dienste und soziale Netzwerke. Dabei dienen digitale Angebote nicht nur der Live-Übertragung, sondern auch dem Abruf von Spielständen, Nachrichten, Analysen und Highlight-Clips. Dieser Wandel verdeutlicht, wie stark die Digitalisierung das Fan-Erlebnis und den Sportkonsum insgesamt verändert hat (Perrin et al., 2023). So wird der Stadionbesuch nicht nur als Event, sondern als Erlebnis intensiviert, das durch maßgeschneiderte, digitale Inhalte und exklusive Angebote den Umsatz pro Besucher:in anhebt.

4 Diskussion und Ausblick

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Steigerung des Pro-Kopf-Umsatzes nicht nur durch eine Erhöhung der Preise, sondern vor allem durch die Verbesserung des Erlebnisses und die gezielte Schaffung zusätzlicher Angebote und Services erreicht werden kann. Dies erfordert eine intelligente Kombination aus digitalen Lösungen, einem flexiblen Angebot und der Schaffung exklusiver Erlebnisse, die den Fans Mehrwert bieten und die Zahlungsbereitschaft erhöhen. Die vorliegende Analyse hat zentrale wirtschaftliche Handlungsfelder moderner Fußballstadien identifiziert und systematisch aufgearbeitet. Im Mittelpunkt steht die Erkenntnis, dass die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit eines Stadions heute nicht mehr allein von der sportlichen Nutzung abhängt. Vielmehr ist ein integrativer Ansatz erforderlich, der auf Zielgruppenfokussierung, Digitalisierung und Mantelnutzung basiert. Die Steigerung des Pro-Kopf-Umsatzes erweist sich dabei als wesentliche betriebswirtschaftliche Zielgröße. Sie lässt sich durch eine Vielzahl koordinierter Maßnahmen entlang der Spieltagerfahrung realisieren – etwa durch digitale Bestellsysteme, personalisierte Verkaufsangebote, verkürzte Wartezeiten und Erlebnisdifferenzierung. Die differenzierte Ansprache verschiedener Nutzer:innengruppen – von VIPs über Familien bis zu Gelegenheitsbesucher:innen – bildet hierfür die Grundlage. Von besonderer Bedeutung ist zudem die Mantelnutzung: Nur durch eine Ausweitung der Veranstaltungs- und Nutzungsmöglichkeiten über Spieltage hinaus kann die infrastrukturelle Kapitalbindung eines Stadions wirtschaftlich nachhaltig gestaltet werden. Dabei zeigt sich, dass Business-, Freizeit- und Kulturbereiche zunehmend in das Stadionkonzept integriert werden müssen – sowohl zur Ertragssicherung als auch zur Positionierung des Stadions als urbanes Zentrum mit gesellschaftlicher Relevanz. Ausblickend lässt sich prognostizieren, dass sich diese Entwicklung in den kommenden Jahren weiter intensivieren wird. Das „Fußballstadion der Zukunft“ wird vermehrt als digitale, multifunktionale Plattform gedacht – in seiner Funktion als emotionaler Erlebnisraum, wirtschaftlicher Standort und sozialer Treffpunkt. Die Aufgabe von Clubs, Kommunen und Planer:innen besteht darin, diesen Transformationsprozess aktiv und strategisch zu gestalten.

Literaturverzeichnis

- Behrenbeck, K., Tacke, T., Schreiber, N., Schlappa, M., Krüger, H., Frevel, N., & Beiderbeck, D. (2020). *Unternehmen Bundesliga – Die ökonomische Bedeutung des Profifußballs in Deutschland*. McKinsey & Company. https://media.dfl.de/sites/2/2020/09/2020_Bundesliga_Studie_Deutsch.pdf (Zugriff am 6. August 2025)
- DFL Stiftung. (2025). *Lernort Stadion*. <https://www.dfl-stiftung.de/was-uns-bewegt/gesellschaftliches-miteinander/lernort-stadion/> (Zugriff am 6. August 2025)
- DFL Deutsche Fußball Liga. (2023). *DFL Wirtschaftsbericht 2023/24*. https://report.dfl.de/2324/de/_assets/downloads/entire-dfl-er24.pdf (Zugriff am 6. August 2025)
- DFL Deutsche Fußball Liga. (2024). *DFL Wirtschaftsreport 2024*. https://media.dfl.de/sites/2/2024/03/3XMcqMwrz_DFL_Wirtschaftsreport_2024_DE.pdf (Zugriff am 6. August 2025)
- Flick, U., von Kardorff, E., & Steinke, I. (2007). *Qualitative Forschung: Ein Handbuch* (5. Aufl.). Rowohlt Taschenbuch.
- Flick, U., von Kardorff, E., Keupp, H., von Rosenstiel, L., & Wolff, S. (1995). *Handbuch qualitativer Sozialforschung* (3. Aufl.). Psychologie Union.
- Hellmann, B., Jeschke, F., Partecke, I., Pauer, C., & Pundt, G. (2023). *Crowd management. Stadionwelt Inside*, 4–19. <https://www.stadionwelt.de/ebooks/crowd-management/> (Zugriff am 6. August 2025)
- KPMG. (2022). *A new game for sports arena business suites – Transforming sports venue hospitality suites into dynamic "business suites" can be a win-win for arena owners and businesses*. <https://kpmg.com/kpmg-us/content/dam/kpmg/pdf/2022/new-game-sports-arena-business-suites.pdf> (Zugriff am 6. August 2025)
- Krüger, A., & Dreyer, A. (2004). *Sportmanagement – Eine themenbezogene Einführung*. Oldenbourg. <https://doi.org/10.1515/9783486781861>
- Mayring, P. (2002). *Einführung in die qualitative Sozialforschung*. Beltz.
- Nufer, G., & Zuch, L. (2015). *Connected stadium: Der Nutzen vernetzter Sportarenen. Nachspielzeit – Die Schriftenreihe des Deutschen Instituts für Sportmarketing*, 3(5), 1–4.
- Perrin, J.-B., Casteau, R., Vasselin, K., Burghes, R., Buvat, J., Kanakadandi, S., & Shah, H. (2023). *A whole new ball game: Why sports tech is a game changer*. Capgemini Research Institute. https://prod.ucwe.capgemini.com/wp-content/uploads/2023/06/CRI_Tech-in-sports_Report_Final_Web-version2.pdf (Zugriff am 6. August 2025)

- Schroer, M. (2009). *Materielle Formen des Sozialen: Die Architektur der Gesellschaft aus Sicht der sozialen Morphologie*. In J. Fischer & H. Delitz (Hrsg.), *Die Architektur der Gesellschaft: Theorien für die Architektursoziologie* (S. 19–48). transcript.
- Sieweck, J. (2016). *Wirtschaftsfaktor Fußball: Der Milliarden-Markt rund um den Fußball*. BoD – Books on Demand.
- UEFA. (2024). *The European club finance and investment landscape*. <https://cdn.vev.design/private/aTCxVXgBbmVvmw45NvpIseApVuy2/1joo9t-uefa-benchmarking-ecfil-report-2024.pdf> (Zugriff am 6. August 2025)

Ein konzeptioneller Ansatz zur textbasierten Persönlichkeitsmodellierung für den Einsatz in der digitalen Forensik

Lorenz Dumanski, Michael Spranger

Kontakt: Lorenz Dumanski, Hochschule Mittweida, dumanski@hs-mittweida.de

Zusammenfassung

Die digitale Forensik steht zunehmend vor der Herausforderung, relevante Kommunikationsteilnehmer:innen in großen, heterogenen Datensätzen effizient zu identifizieren. Besonders in Ermittlungsverfahren, die überwiegend auf digitalen Kommunikationsdaten basieren, wird dies zu einer zentralen Aufgabe. Ein wesentliches Problem besteht dabei in der Priorisierung und Identifizierung relevanter Akteur:innen über mehrere Asservate hinweg. Die digitale Persönlichkeitsmodellierung kann hierzu einen neuartigen Lösungsansatz bieten: Ist das Persönlichkeitsprofil einer verdächtigen Person bekannt oder modelliert, lässt sich daraus potenziell eine Priorisierungsstrategie ableiten. Dieses Konzeptpapier schlägt einen semantisch fundierten Ansatz vor, bei dem psychometrische Testaussagen aus etablierten Persönlichkeitsmodellen, wie etwa dem Five Factor Model, in kommunikative Szenarien überführt werden, um digitales Sprachverhalten im Sinne dieser Aussagen interpretierbar zu machen. Grundlage ist ein methodisches Design, das geeignete Sprachbeispiele in typisierten Kontextsituationen sammelt, annotiert und auswertbar macht. Ziel ist die Entwicklung eines Analysemodells, das aus beobachtetem Kommunikationsverhalten plausible Antworttendenzen auf standardisierte Persönlichkeitsskalen ableiten kann. Damit liefert das Konzept einen Beitrag zur digitalen Persönlichkeitsmodellierung und schafft eine methodische Brücke zwischen psychologischer Diagnostik und maschinell gestützter Textanalyse im forensischen Anwendungskontext.

Schlüsselwörter: digitale Forensik, Persönlichkeitsmodellierung, Kommunikationsszenarien, Natural Language Processing, FFM, OCEAN, Big-Five.

1 Einführung

Erfahrungsgemäß sind Ermittlungsbehörden mit sehr großen Datenmengen konfrontiert. Sichergestellte Mobiltelefone enthalten unter Umständen mehrere Zehntausend, in manchen Fällen auch bis zu mehreren hunderttausend Nachrichten zwischen verschiedenen Beteiligten. Wie die ermittlungsunterstützende Arbeit der Autor:innen zeigte, ist dabei nur ein Bruchteil der Kommunikationsdaten für die eigentliche Ermittlungsarbeit relevant. Demnach ist eine effektive Vorfilterung der Daten, um relevante Akteur:innen zu inkludieren und irrelevante Konversationen auszublenden, entscheidend, um die Ermittlung maßgeblich zu beschleunigen. Wenn keine gezielte Suche nach relevanten Kommunikationsinhalten möglich ist, die verdächtigen Personen unbekannt sind und sich keine offensichtlichen Zusammenhänge in den Daten erkennen lassen,

erfordern entsprechende Verfahren erfahrungsgemäß einen hohen Zeit- und Personalaufwand.

Es existieren bereits Verfahren, die bei der Eingrenzung potenzieller Autor:innen unterstützen (He et al., 2024). Eine wichtige Aufgabe in diesem Zusammenhang ist die Autorenschaftsattributions. Hierbei werden Texte anhand sprachlicher Merkmale wie Wortwahl, Satzbau oder stilistische Eigenheiten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit denselben möglicherweise unbekannten Urheber:innen zugeordnet (Juola, 2008). Dabei kommen unter anderem Methoden aus den Bereichen Machine Learning (ML), Deep Learning (DL) und Natural Language Processing (NLP) zum Einsatz. Dabei löst die Autorenschaftsattributions allerdings nicht das Problem der initialen Priorisierung.

Persönlichkeit kann hier ein wegweisender Ansatz sein, relevante Kommunikation zu identifizieren. Bei Persönlichkeit handelt es sich um ein psychologisch geprägtes Forschungsgebiet, dessen zentrales Ziel darin besteht, die Vielfalt und individuellen Unterschiede zu beschreiben, die Menschen auszeichnen (Roberts & Yoon, 2022). Ein populäres Modell, um Persönlichkeit zu beschreiben, ist das Five Factor Model (FFM) (auch bekannt als *OCEAN* oder *Big-Five*) (R. R. McCrae & Costa, 2008). Das FFM wird im Abschnitt 2 näher betrachtet.

Die Operative Fallanalyse (OFA) beschreibt ein kriminalistisches Werkzeug, bei dem speziell ausgebildete Ermittlungsteams unter anderem Tathergänge rekonstruieren und Täterprofile erstellen (Bundeskriminalamt, 2025). Die Erstellung eines Täterprofils ist bei der OFA dabei ein fester Bestandteil der Methodik. Potenzial ist darin zu sehen, ein solches Persönlichkeitsprofil der gesuchten Person, wie es im Rahmen der OFA angefertigt wird, beispielsweise basierend auf dem FFM, für die Vorfilterung von Kommunikation in einem Ermittlungsverfahren zu verwenden. Vor diesem Hintergrund besteht die zentrale Forschungsfrage darin, ob sich Persönlichkeit im digitalen Raum computergestützt modellieren und auf Basis realer Kommunikationsdaten ableiten lässt. Das vorliegende Konzeptpapier nähert sich dieser Forschungsfrage, indem ein neuartiger Ansatz vorgeschlagen wird, wie Persönlichkeitsmerkmale in den digitalen Raum übertragen und in einem forensischen Nutzermodell abgebildet werden können. Dieser Ansatz geht von der Hypothese aus, dass die Interpretation von Kommunikationsverhalten zuverlässigere Hinweise auf die Persönlichkeit liefert, als in der bisherigen Forschung häufig eingesetzte lexikalische Merkmale der Kommunikationsanteile von Teilnehmenden (vgl. Abschnitt 3).

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen theoretisch-konzeptionellen Ansatz vorzustellen, der die Grundlage für weiterführende Forschung in diesem Bereich bildet. Dazu

wird zunächst im Abschnitt 2 eine kurze Einführung in das FFM gegeben. Abschnitt 3 dient zur Übersicht verwandter Literatur und zeigt die entsprechende Forschungs- und Datenlücke auf, die mithilfe des neuen Ansatzes adressiert werden soll. Anschließend wird in Abschnitt 4 ein Überblick über das Verfahren von einer High-Level-Perspektive aus skizziert. Danach folgt der für das Verfahren ermittelte methodische Ansatz in Abschnitt 5. Schließlich werden die Inhalte in einem Fazit und einem Ausblick im Abschnitt 6 zusammengefasst.

2 Five Factor Model

Die Persönlichkeit im FFM wird mit fünf verschiedenen Dimensionen gemessen (Costa & McCrae, 1992; R. R. McCrae & Costa, 2008). Piedmont (1998) stellt dabei einen interpretativen Überblick der Dimensionen unter Berücksichtigung der Entwicklung des Modells bereit:

1. **Offenheit für Erfahrungen** (*Openness to Experience*): Beschreibt die Bereitschaft, den Willen und die Wertschätzung für neue Erfahrungen zu zeigen und das Interesse an neuen, unbekannten beziehungsweise ungewöhnlichen Dingen (Piedmont, 1998). Offenheit umfasst dabei auch die Toleranz gegenüber dem Unbekannten oder dem Unvertrauten und die damit einhergehende Bereitschaft, sich damit auseinanderzusetzen.

Dabei wird zwischen neugierigen, originellen, unkonventionellen, kreativen Individuen und jenen, die eher das Gegenteil verkörpern, unterschieden.

2. **Gewissenhaftigkeit** (*Conscientiousness*): Gewissenhaftigkeit erfasst, wie stark eine Person in ihrem Handeln organisiert, ausdauernd und zielstrebig ist (Piedmont, 1998). Diese Eigenschaft stellt zuverlässige, gründliche und pflichtbewusste Menschen, die strukturiert arbeiten, Verantwortung übernehmen und langfristige Ziele verfolgen, gegen nachlässige, unordentliche und unmotivierte Personen, die Aufgaben oberflächlich angehen und wenig Durchhaltevermögen zeigen.

Zusätzlich umfasst dieser Bereich auch die Fähigkeit zur Selbstkontrolle und zur Aufschiebung von Bedürfnisbefriedigung beziehungsweise die Bereitschaft, kurzfristige Belohnungen zugunsten langfristiger Erfolge zurückzustellen.

3. **Extraversion** (*Extraversion*): Dieser Bereich unterscheidet zwischen geselligen, aktiven, kontaktfreudigen Individuen und solchen, die zurückhaltend, ernst, zurückgezogen und ruhig sind (Piedmont, 1998). Es werden zwei Aspekte bewertet: die interpersonelle Einbindung beziehungsweise, wie sehr eine Person die Gesellschaft anderer genießt, und das persönliche Aktivitätsniveau.
4. **Verträglichkeit** (*Agreeableness*): Verträglichkeit erfasst, wie freundlich, altruistisch und kompromissbereit (oder umgekehrt konfliktorientiert und berechnend) eine Person im Umgang mit anderen ist (Piedmont, 1998).

Auf der einen Seite befinden sich prosoziale, mitfühlende, vertrauensvolle, verständnisvolle und warmherzige Haltungen, die die kooperativen, harmonischen und fürsorglichen Aspekte einer Person erfassen. Auf der anderen Seite stehen konfrontative, zynische, manipulative, rachsüchtige und skrupellose Eigenschaften, die eine egozentrische, strategische und kalt kalkulierende Haltung implizieren.

5. **Neurotizismus** (*Neuroticism*): Die Dimension erfasst die emotionale Stabilität des Individuums.

Ein hoher Wert in dieser Dimension impliziert Anfälligkeit für Stress, impulsives Handeln und die Tendenz, die Realität verzerrt wahrzunehmen (Piedmont, 1998). Dabei stehen psychische Erkrankungen auf Verdacht im Zusammenhang mit Neurotizismus (Piedmont, 1998; Widiger & Oltmanns, 2017; Wolska & Malina, 2020).

Die Dimensionen werden in der Regel mit selbstausskunftsbasierten Tests erfasst und gemessen. Beim FFM im Speziellen werden die Dimensionen aus den sogenannten Facetten inferiert. Jede Dimension setzt sich dabei aus sechs Facetten zusammen (Goldberg, 1992). Darüber hinaus gilt das FFM als relativ konstant, unabhängig von Alter, Geschlecht oder Situation (Costa & McCrae, 2002; R. McCrae & Costa, 1982).

3 Verwandte Arbeiten

In der Arbeit von Argamon et al. (2005) wurden lexikalische Features aus informellen Texten, welche die Dimensionen Extraversion und Neurotizismus des FFM beschreiben könnten, untersucht. Dabei nutzten die Autor:innen Funktionswörter, konjunktive Phrasen, Modalitätsindikatoren sowie Bewertungsadjektive und -modifikatoren (Appraisal). Ihre Ergebnisse zeigten, dass Appraisal-Merkmale der stärkste Prädiktor für Neurotizismus waren, wobei hoher Neurotizismus mit negativer und selbstbezogener Bewertung einherging, während niedriger Neurotizismus durch positive und objektbezogene Bewertung charakterisiert war. Für Extraversion erwiesen sich hingegen Funktionswörter als die besten Indikatoren. Diese Studie demonstriert somit, dass die Wortwahl einer Autorin bzw. eines Autors signifikante Hinweise auf ihre Persönlichkeit geben kann und legt einen Grundstein für die Verwendung von linguistischen Merkmalen in Kombination mit ML-Techniken für die Persönlichkeitsklassifizierung. Die Autor:innen der Studie nutzten dabei einen Datenkorpus, der aus 1157 studentischen Essays besteht. Da es sich dabei um akademische Arbeiten handelt, die keine natürliche Kommunikation beinhalten, lassen sich die Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf reale Kommunikationsdaten übertragen.

Viele der bisher erschienenen Forschungsarbeiten, deren Ziel die Ableitung von psychologischen Merkmalen aus Text darstellt, fußen auf den Linguistic Inquiry and Word Count (LIWC)-Wortkategorien (beispielsweise: Bhargava et al. (2018), Sewwandi et al. (2017), Tadesse et al. (2019), Tausczik und Pennebaker (2010), um ein paar zu erwähnen). Bei LIWC handelt es sich um ein psycholinguistisches Wörterbuch, das initial von Pennebaker et al.

(2015) entwickelt wurde. Dabei werden Wörter mithilfe mehrerer Psycholog:innen in verschiedene Kategorien eingeteilt. Die aktuellste Version (LIWC-22) umfasst 84 Wortkategorien (Boyd et al., 2022). Die Vorgängerversion mit 52 Wortkategorien wurde bereits für die deutsche Sprache transponiert und angepasst (Meier et al., 2019). Die Metaanalyse von Koutsoumpis et al. (2022) bricht relevante Aspekte der textbasierten Persönlichkeitsextraktion auf das Wesentliche herunter. Dabei wurden hauptsächlich Studien herangezogen, die die Veräußerung von Persönlichkeit mithilfe der LIWC-Wortkategorien (J. Pennebaker & King, 2000) untersuchen. Dabei fällt auf, dass durch reine textbasierte Verfahren zwar signifikante Zusammenhänge zwischen den verwendeten Wortgruppen und Persönlichkeitsmerkmalen im statistischen Sinne bestehen, diese aber nicht ausreichend korrelieren, um zuverlässige Aussagen über die Persönlichkeit zu tätigen. Koutsoumpis et al. (2022) verweisen dabei auf die Relevanz von Situations- und Reaktionsbezogenheit einzelner Individuen für die Bemessung der Persönlichkeitsdimensionen und warnen vor einer ausschließlich auf Wortkategorien basierenden Methodik bei der Klassifizierung. Eine amerikanische Studie des IBM Research Instituts untersuchte 2017 die Möglichkeit der FFM-Modellierung anhand von Twitter-Daten (Arnoux et al., 2017). Den Forschenden gelang es, bessere Ergebnisse mit drastisch reduziertem Datenbedarf zu erzielen. Sie nutzten dabei ein Modell, das mathematische Repräsentationen von Wörtern (Word-Embedding Features) mit bewährten statistischen Verfahren (Gaussian Process Regression) kombiniert. Trotz der vielversprechenden Ergebnisse lässt sich mit dem Klassifikationsverfahren keine präzise Aussage über die Persönlichkeit der Autor:innen treffen. Ein auffälliges, wiederkehrendes Muster, das bei der Analyse verwandter Arbeiten aufkam, war die relativ geringe statistische Korrelation zwischen den Persönlichkeitsdimensionen und den textbasierten Features, vgl. z.B. Koutsoumpis et al. (2022). Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die reine lexikalische beziehungsweise semantische Analyse von textbasierten Kommunikationsdaten nicht ausreicht, um die Persönlichkeit zuverlässig abzuleiten. Gjurković und Šnajder (2018) untersuchten einen mit dem Myers-Briggs-Indicator annotierten Datensatz, der aus der Social-Media-Plattform Reddit extrahiert wurde. Sie zeigten dabei, dass die Klassifikation der Persönlichkeit basierend auf LIWC, n-Grammen und psycholinguistischen Wortlisten bessere Ergebnisse erzielte, wenn sie mit Nutzeraktivitätsmerkmalen kombiniert wird. Daraus ergibt sich die Hypothese, dass reine Textdaten zur Erfassung der Persönlichkeit nicht ausreichen und weitere Kriterien an die Verarbeitung gestellt werden müssen. Ein weitaus basaleres Problem besteht in der Datenknappheit. Es existieren zu diesem Zeitpunkt (Oktober 2025) keine frei verfügbaren Datensätze in deutscher Sprache, die mit Annotationen versehen sind, die Rückschlüsse auf die Persönlichkeit zulassen. Einerseits zeigten Mirkin et al. (2015), dass die Klassifizierung bei übersetzten Texten schlechtere Ergebnisse liefert, andererseits deutet eine Studie von Karimnia und Mahjubi (2013) darauf hin, dass die Persönlichkeit der Übersetzer:innen einen Einfluss auf übersetzte Texte haben kann. Die Übersetzung eines annotierten Datensatzes wie beispielsweise in der Studie von

Gjurković und Šnajder (2018) könnte daher die Ergebnisse verfälschen und ist somit nicht zielführend. Diese Datenlücke beschreibt ein zentrales Problem, welches in Abschnitt 5 adressiert wird.

Da die textbasierte Persönlichkeitsforschung im Bereich der Kommunikationsdaten Schwierigkeiten hat, leistungsfähige Klassifikatoren zu bilden, kann dies ein Hinweis darauf sein, dass aktuelle Daten nicht alle relevanten Features berücksichtigen. In der Folge kann dies ein Hemmnis bei der Verbesserung von ML-basierten Verfahren darstellen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bisher kein Verfahren besteht, das über die Analyse von ausschließlich sprachlich-lexikalischen Merkmalen hinausgeht.

4 Konzept zur Persönlichkeitsmodellierung in der digitalen Forensik

Der konzeptionelle Richtungswechsel wird wie folgt skizziert: Anstatt ausschließlich sprachliche Merkmale (lexikalisch, stilometrisch oder kategoriebasiert) mit Persönlichkeitsdimensionen zu korrelieren, wird versucht, die zugrunde liegenden Persönlichkeitsinventare selbst auf Kommunikationsszenarien zu übertragen. Persönlichkeits-tests wie das FFM basieren auf Frageinventaren, die in standardisierten Verfahren (zum Beispiel Likert-Skalen) durch Selbstauskunft beantwortet werden. Dabei werden Aussagen wie „Ich gehe gerne auf andere Menschen zu“ auf mehrstufigen Antwortskalen (zum Beispiel 1–5) bewertet. Ob und wie sich bestimmte Inventarfragen in Kommunikationsdaten widerspiegeln, etwa durch Interaktionsverhalten, Themenwahl oder Ausdrucksweise, ist dabei von essenzieller Bedeutung.

Dabei soll kommunikatives Verhalten aus Beobachterperspektive so interpretiert werden, dass plausible Antworten auf konkrete Persönlichkeitsfragen abgeleitet werden können. Am Beispiel der Aussage „Ich gehe gerne unter Leute“ wird das System zunächst relevante Kommunikationsausschnitte identifizieren und thematisch zuordnen. Ein solcher Kommunikationsausschnitt enthält beispielsweise die Planung oder (Nach-)Besprechung gesellschaftlicher Aktivitäten. Anschließend berechnet ein Algorithmus auf Basis klassischer Merkmalsdimensionen, etwa lexikalischer, stilometrischer oder affektiver Eigenschaften, in welcher Ausprägung die jeweilige Aussage auf einer Likert-Skala zutrifft. Wie genau die Daten auf die Likert-Skalen und das Frageinventar gemappt werden können, wird in einem gesonderten Vorhaben untersucht. Um die Verknüpfung von Inventaraussage und algorithmischer Bewertung zu ermöglichen, ist der Zugriff auf eine geeignet annotierte Datenbasis essenziell.

Auf diese Weise entsteht so ein neuartiger Ansatz zur digitalen Persönlichkeitsmodellierung, der psychologische Theoriebildung mit informatischen Verfahren methodisch integriert.

5 Methodik

Zur Bildung der Methodik wird ein gestaltungsorientierter Forschungsansatz im Sinne der Design Science Research (DSR) von Hevner et al. (2004) vorgeschlagen. Ziel ist die Entwicklung eines algorithmischen Analysemodells, das

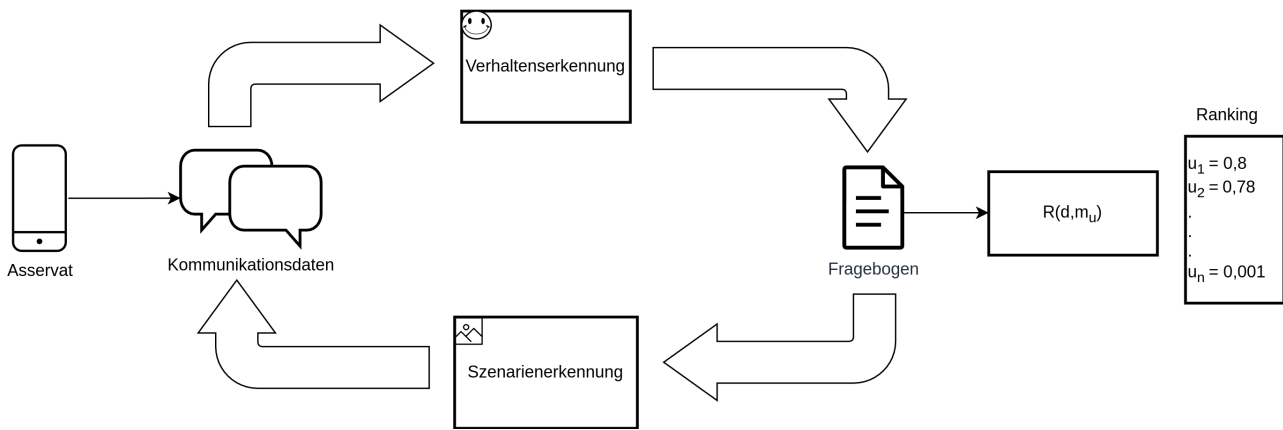


Abbildung 1: Prototypische Darstellung des Ansatzes: R - Rankingfunktion, d - Persönlichkeitsdimension, m_u - Nachrichten der Nutzer:in, u_n - gerankte Kommunikationsteilnehmer:in.

kommunikatives Verhalten in digitalen Texten so interpretieren kann, dass sich daraus plausible Antworttendenzen auf psychometrische Testaussagen ableiten lassen.

5.1 Problemstellung und Zieldefinition

Ausgangspunkt ist die Beobachtung, dass bestehende Verfahren zur textbasierten Persönlichkeitsmodellierung auf korrelativen Zusammenhängen zwischen linguistischen Merkmalen und Persönlichkeitsdimensionen beruhen. Diese Verfahren zeigen jedoch in der Praxis geringe statistische Robustheit und eingeschränkte Übertragbarkeit auf realweltliche Kommunikationsdaten (siehe Abschnitt 3). Ziel ist daher nicht die Klassifikation über Markerlisten, sondern die semantische Bewertung kommunikativer Situationen vor dem Hintergrund psychometrischer Testaussagen.

5.2 Forschungsstrategie und Artefaktentwicklung

Das methodische Vorgehen folgt dem Aufbauzyklus der DSR und gliedert sich in vier zentrale Phasen:

1. **Übertragung psychometrischer Items auf Kommunikationsszenarien:** Ausgewählte Aussagen aus etablierten Persönlichkeitsinventaren werden analysiert und hinsichtlich ihrer semantischen Kernaussagen klassifiziert. Auf dieser Basis werden hypothetische Kommunikationssituationen entworfen, in denen sich diese Aussagen implizit oder explizit manifestieren können (z.B. Aussagen zu Kontaktfreudigkeit in Gruppenchats, Umgang mit Kritik, sprachlicher Ausdruck von Emotionen).
2. **Datengenerierung und Annotation:** Die Kommunikationsszenarien werden über eine szenariengestützte Annotationsumgebung operationalisiert. Hierbei interagieren Proband:innen mit einem Künstliche Intelligenz (KI)-System (z.B. einem feingetunten FFM), das in definierte Rollen und Kommunikationsziele eingebettet ist. Vor und nach dem Dialog geben die Proband:innen Selbstaussagen zu ihrer Persönlichkeit, wodurch Ground-Truth-Daten entstehen. Die Kommunikationsverläufe werden anschließend hinsichtlich ihrer seman-

tischen Nähe zu den Testitems annotiert (Likert-Skalen-Abbildung). Dabei ist jeder Schritt modular und mithilfe eines datenbankgestützten Backends beschrieben. Dies ermöglicht die Verwendung des Systems unabhängig von den hier beschriebenen Use-Cases.

Der daraus resultierende Datensatz wird, unter der Voraussetzung, dass die Proband:innen dem zugestimmt haben, zur Verwendung für Forschungszwecke veröffentlicht. Dabei handelt es sich potenziell um den ersten frei verfügbaren deutschen Datensatz, der digitale Kommunikationsdaten mit vollständigen Persönlichkeitsprofilen verbindet. Darüber hinaus ist die Veröffentlichung des Datenerhebungssystems als Softwarekomponente zur Erhebung von Daten außerhalb des hier beschriebenen Rahmens geplant.

Um dem durch KI entstehenden Bias entgegenzuwirken, müssen die durch das System erhobenen Daten zusätzlich mit realen Kommunikationsdaten angereichert werden. Idealerweise geschieht dies durch dieselben Proband:innen im Rahmen der Datenerhebungsumgebung. Real bedeutet in diesem Kontext digitale Unterhaltungen zwischen mindestens zwei menschlichen Personen, die ebenfalls an Szenarien geknüpft sind.

3. **Modellentwicklung:** Das zentrale Artefakt ist ein Analysemodell, das auf Basis von Textabschnitten eine Wahrscheinlichkeitsverteilung über Antwortkategorien einzelner Persönlichkeitsaussagen berechnet. Es wird hierbei untersucht, inwiefern sich Inventarfragen zur Erkennung von Persönlichkeitsmerkmalen in bestimmten Textsequenzen und Aussagen der Gesprächsteilnehmer:innen widerspiegeln. Methodisch kommen je nach Evaluationsphase unterschiedliche Varianten zum Einsatz, beispielsweise Embedding-basierte Klassifikatoren, Prompt-Design für Zero-Shot-LLMs oder Fine-Tuning auf annotierten Szenarien.
4. **Evaluationsstrategie:** Die Evaluationsstrategie ist eng mit der Entwicklung verknüpft und wird in Abschnitt 5.3 gesondert dargestellt.

Dabei wird unter einer Antworttendenz die durch das Modell geschätzte Wahrscheinlichkeit verstanden, mit der eine Kommunikationssituation einer bestimmten Ausprägung einer psychologischen Inventaraussage (z.B. auf einer Likert-Skala) entspricht. Eine plausible Antwort bezeichnet in diesem Zusammenhang jene Skalenposition, die, aus Beobachtenden- oder Modellperspektive, semantisch, kontextuell und expressiv am stärksten durch das beobachtete Verhalten gestützt wird. Diese Begriffsbestimmungen bilden die Grundlage für die algorithmische Bewertung sowie die spätere Validierung durch Ground Truth und Expertenurteile.

5.3 Evaluation

Die Evaluation des entwickelten Analysemodells erfolgt auf mehreren Ebenen:

1. **Vergleich mit Ground Truth:** Die vom Modell vorhergesagten Antworttendenzen werden mit den tatsächlichen Selbstauskünften der Proband:innen verglichen, um Genauigkeit und Konsistenz zu prüfen.
2. **Expert:inneneinschätzung:** Fachpersonen aus Psychologie oder forensischer Linguistik bewerten ausgewählte Szenarien hinsichtlich ihrer Persönlichkeitsaussagekraft. Dies erlaubt die Einschätzung der Plausibilität des Analysemodells.
3. **Interrater-Reliabilität:** Für manuell annotierte Szenarien wird die Übereinstimmung zwischen unabhängigen Annotator:innen bestimmt, um die Konsistenz des Mappings abzusichern.
4. **Vergleich mit bestehenden Verfahren:** Zur Einordnung des Ansatzes werden etablierte Verfahren (z.B. LIWC-basierte Analysen, n-Gramm-Klassifikation, klassische ML-Modelle) auf denselben Datensätzen angewendet. Der Vergleich umfasst Kriterien wie Klassifikationsgenauigkeit, Kontextrobustheit und Interpretierbarkeit.

Die Kombination quantitativer und qualitativer Bewertungsverfahren soll eine umfassende Einschätzung der Aussagekraft, Generalisierbarkeit und praktischen Relevanz des Modells ermöglichen.

5.4 Systemübersicht

Abbildung 1 zeigt den konzeptionellen Ablauf des Analyseverfahrens. Die Kommunikationstexte (z.B. aus einem Asservat) durchlaufen eine Szenarien- und Reaktionsanalyse, um relevante Textpassagen im Sinne der Inventarfragen zu identifizieren. Diese werden im Hinblick auf spezifische Persönlichkeitsdimensionen interpretiert. Die zentrale Rankingfunktion berechnet für jede:n Kommunikationsbeteiligte:n einen Übereinstimmungswert mit dem vorgegebenen Persönlichkeitsprofil.

5.5 Limitationen und Abgrenzung

Die Anwendung des Ansatzes unterstützt primär forensische Anwendungsszenarien. Die erzeugten Modelle sind weder für Recruiting- noch für Marketingzwecke gedacht

und werden nicht zur Individualdiagnostik im Alltag eingesetzt. Zudem ist die Validität stark abhängig von der Szenarienqualität, der Aussagekraft der Dialoge sowie der Qualität der Annotation. Diese Faktoren werden im Rahmen der Evaluation kontinuierlich geprüft und dokumentiert.

6 Fazit

Ausgehend von der Beobachtung, dass die Identifizierung von Kommunikationsteilnehmer:innen in heterogenen Datensätzen für die forensische Analyse von zentraler Bedeutung ist, bestehende Verfahren jedoch häufig auf instabilen, rein stilometrischen Merkmalen basieren, verfolgte dieses Konzeptpapier das Ziel, einen neuartigen Ansatz zur Erkennung von Persönlichkeitsmerkmalen zu entwickeln, der zur stabileren Identifizierung der Teilnehmer:innen beitragen kann.

Das vorgestellte Verfahren zur textbasierten Persönlichkeitsmodellierung überträgt psychometrische Testaussagen auf kommunikative Szenarien und schlägt damit eine methodische Brücke zwischen psychologischer Diagnostik und KI-gestützter Textanalyse.

Der Ansatz verfolgt die Hypothese, dass die semantische Interpretation von Kommunikationsverhalten zuverlässigere Persönlichkeitsindikatoren liefert als rein lexikalische Marker. Ob und in welchem Umfang dies gelingt, soll in zukünftigen Arbeiten durch die Entwicklung eines prototypischen Analysemodells, die Generierung annotierter Daten und einen systematischen Vergleich mit etablierten Verfahren untersucht werden.

Langfristig besteht das Potenzial, Ermittlungsverfahren zu unterstützen, indem große Datenmengen effizienter vorgefiltert werden. Die Umsetzung dieses Konzepts steht jedoch noch am Anfang und erfordert umfangreiche Evaluationen, bevor es in der Praxis Anwendung finden kann. Der nächste Schritt, um das in diesem Konzeptpapier vorgestellte Verfahren umzusetzen, besteht in der Implementierung und Inbetriebnahme einer Datenerhebungs- und Datenannotierungsplattform.

Literaturverzeichnis

- Argamon, S., S. D., Koppel, M., & Pennebaker, J. (2005, Januar 1). Lexical Predictors of Personality Type.
- Arnoux, P.-H., Xu, A., Boyette, N., Mahmud, J., Akkiraju, R., & Sinha, V. (2017). 25 Tweets to Know You: A New Model to Predict Personality with Social Media. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*, 11(1), 472–475. <https://doi.org/10.1609/icwsm.v11i1.14963>
- Bharadwaj, S., Sridhar, S., Choudhary, R., & Srinath, R. (2018). Persona Traits Identification based on Myers-Briggs Type Indicator(MBTI)—A Text Classification Approach. *2018 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 1076–1082. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2018.8554828>
- Boyd, R., Ashokkumar, A., Seraj, S., & Pennebaker, J. (2022). The Development and Psychometric Properties of LIWC-22.

- <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23890.43205>
- Bundeskriminalamt. (2025). BKA - Operative Fallanalyse (OFA). https://www.bka.de/DE/UnsereAufgaben/Ermittlungsgunterstuetzung/OperativeFallanalyse/operative-fallanalyse_node.html
- Costa, P., & McCrae, R. (1992). Neo PI-R professional manual. Psychological Assessment Resources, 396.
- Costa, P., & McCrae, R. (2002). Personality in Adulthood: A Five-Factor Theory Perspective. *Management Information Systems Quarterly - MISQ*. <https://doi.org/10.4324/9780203428412>
- Gjurković, M., & Šnajder, J. (2018). Reddit: A Gold Mine for Personality Prediction. 87–97. <https://doi.org/10.18653/v1/W18-1112>
- Goldberg, L. R. (1992). The development of markers for the Big-Five factor structure. *Psychological Assessment*, 4(1), 26–42. <https://doi.org/10.1037/1040-3590.4.1.26>
- He, X., Lashkari, A. H., Vombatkere, N., & Sharma, D. P. (2024). Authorship Attribution Methods, Challenges, and Future Research Directions: A Comprehensive Survey. *Information-an International Interdisciplinary Journal*, 15(3), 131. <https://doi.org/10.3390/info15030131>
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75–105. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Juola, P. (2008). Authorship Attribution. *Foundations and Trends® in Information Retrieval*, 1(3), 233–334. <https://doi.org/10.1561/15000000005>
- Karimnia, A., & Mahjubi, M. (2013). Individual Differences and Quality Of Translation: A Personality-Based Perspective. *Psychology of Language and Communication*, 17(1), 37–64. <https://doi.org/10.2478/plc-2013-0003>
- Koutsoumpis, A., Oostrom, J. K., Holtrop, D., van Breda, W., Ghassemi, S., & de Vries, R. E. (2022). The kernel of truth in text-based personality assessment: A meta-analysis of the relations between the Big Five and the Linguistic Inquiry and Word Count (LIWC). *Psychological Bulletin*, 148(11–12), 843–868. <https://doi.org/10.1037/bul0000381>
- McCrae, R., & Costa, P. (1982). Self-concept and the stability of personality: Cross-sectional comparisons of self-reports and ratings. *Journal of Personality and Social Psychology*, 43, 1282–1292. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.43.6.1282>
- McCrae, R. R., & Costa, P. (2008). Empirical and theoretical status of the five-factor model of personality traits. *Sage handbook of personality theory and assessment*, 1, 273–294. <https://doi.org/10.4135/9781849200462.n13>
- Meier, T., Boyd, R. L., Pennebaker, J. W., Mehl, M. R., Martin, M., Wolf, M., & Horn, A. B. (2019, Februar 14). “LIWC auf Deutsch”: The Development, Psychometrics, and Introduction of DE- LIWC2015. <https://doi.org/10.31234/osf.io/uq8zt>
- Mirkin, S., Nowson, S., Brun, C., & Perez, J. (2015). Motivating Personality-aware Machine Translation. In L. Màrquez, C. Callison-Burch, & J. Su (Hrsg.), *Proceedings of the 2015 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing* (S. 1102–1108). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/D15-1130>
- Pennebaker, J., & King, L. (2000). Linguistic styles: Language use as an individual difference. *Journal of personality and social psychology*, 77, 1296–1312. <https://doi.org/10.1037//0022-3514.77.6.1296>
- Pennebaker, J. W., Boyd, R. L., Jordan, K., & Blackburn, K. (2015, September 15). The Development and Psychometric Properties of LIWC2015. The University of Texas at Austin. <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/31333>
- Piedmont, R. L. (1998). Interpreting the NEO PI-R. In R. L. Piedmont (Hrsg.), *The Revised NEO Personality Inventory: Clinical and Research Applications* (S. 79–112). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3588-5_3
- Roberts, B. W., & Yoon, H. J. (2022). Personality Psychology. *Annual Review of Psychology*, 73, 489–516. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-020821-114927>
- Sewwandi, D., Perera, K., Sandaruwan, S., Lakchani, O., Nugaliyadde, A., & Thelijjagoda, S. (2017). Linguistic features based personality recognition using social media data. 2017 6th National Conference on Technology and Management (NCTM), 63–68. <https://doi.org/10.1109/NCTM.2017.7872829>
- Tadesse, M. M., Lin, H., Xu, B., & Yang, L. (2019). Detection of Depression-Related Posts in Reddit Social Media Forum. *IEEE access: practical innovations, open solutions*, 7, 44883–44893. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909180>
- Tausczik, Y., & Pennebaker, J. (2010). The Psychological Meaning of Words: LIWC and Computerized Text Analysis Methods. *Journal of Language and Social Psychology*, 29, 24–54. <https://doi.org/10.1177/0261927X09351676>
- Widiger, T. A., & Oltmanns, J. R. (2017). Neuroticism is a fundamental domain of personality with enormous public health implications. *World Psychiatry*, 16(2), 144–145. <https://doi.org/10.1002/wps.20411>
- Wolska, A., & Malina, A. (2020). Personality and attitudes towards people with mental disorders: Preliminary studies results. *International Journal of Social Psychiatry*, 66(3), 270–278. <https://doi.org/10.1177/0020764020906433>

Fachkulturen als Vergrößerungsglas von „gendered organizations“?

Eine Literaturanalyse über geschlechtlich substrukturierte Hochschulen

Franziska Stauche, Theresa Decker, Ramona Kusche

Kontakt: Franziska Stauche, Hochschule Mittweida, stauche@hs-mittweida.de

Zusammenfassung

Hochschulen können als geschlechtlich (sub-)strukturierte Organisationen verstanden werden, in denen Frauen und andere marginalisierte Gruppen nicht dieselben Karrierechancen haben wie Männer. Dieser Beitrag befasst sich mit der Frage, welche Mechanismen geschlechtlicher Hierarchisierungen in der Organisation Hochschule vonstattengehen und inwieweit der Blick auf die Fachkulturen der Analyse der Organisation Hochschule als Vergrößerungsglas dient. Anhand einer systematischen Literaturrecherche kann aufgezeigt werden, dass es vielfache, in der Organisation Hochschule fest verankerte implizite Mechanismen gibt, die Frauen systematisch ausgrenzen. Der Blick auf die Fachkulturen zeigt auf, dass dies in allen Fächern der Fall ist, die Mechanismen sich darin jedoch unterscheiden. Es braucht weitere Forschung, um die Ungleichheitsmechanismen tiefgreifender verstehen und de-maskieren zu können.

Keywords: Fachkulturen, Hochschule, doing gender, Geschlecht, Organisation, Wissenschaft.

1 Einführung

Organisationen sind nicht geschlechtsneutral – sie sind von Grund auf „gendered“ (Acker, 1990), also geschlechtlich substrukturiert. Das bedeutet, dass jegliche Praktiken, symbolische Ordnungen und strukturelle Systeme in Institutionen wie Hochschulen durchzogen sind von Geschlechterverhältnissen. Diese bringen nicht nur Ungleichheiten hervor, sondern können sie auch verstetigen. Das zeigt sich beispielsweise an der „Leaky Pipeline“ bzw. der „Gläsernen Decke“. Beide Begriffe stehen metaphorisch für das Phänomen, dass Frauen¹ auf der Karriereleiter weniger weit kommen als Männer – sie können den „Chef:innen-Sessel“ zwar schon sehen, sich jedoch nicht hineinsetzen bzw. sie verlassen den Karrierpfad vor dem Erreichen des Ziels. In Zahlen zeigt sich das darin, dass der Anteil weiblicher Studienabsolvierender 2023 bei knapp 53% lag, während es bei hauptamtlichen Professuren lediglich knapp 29% waren (Statistisches Bundesamt, 2025). Dieser Zustand betrifft die gesamte Organisation Hochschule und wird demnach berechtigterweise auch als Gemeinschaftsaufgabe verstanden. Dieser Beitrag richtet den Blick jedoch zusätzlich auf ein verhältnismäßig weniger beachtetes, eher indirekt betrachtetes Analysefenster: die Fachkulturen.

Fachkulturen als spezifische kulturelle Ausprägungen innerhalb von Hochschulorganisationen prägen, wie Wissen produziert, bewertet und weitergegeben wird (siehe hierzu Erlemann, 2024, S. 146). Sie werden daher auch verstanden als „unterscheidbare, in sich systematisch verbundene Zusammenhänge von Wahrnehmungs-, Denk-, Wertungs- und Handlungsmustern“ (Liebau & Huber, 1985, S. 315). Fachkulturen sind dabei vielschichtig und schwer eingrenzbar: Neben epistemologischen Charakteristika können auch z.B. der Umgang mit Zeit und die internationale Orientierung innerhalb der Fachdisziplin, aber auch persönlichere Eigenschaften wie Lebensstile oder politische Einstellungen sein (Huber, 1991), die sozusagen kollektiv zum Vorschein kommen.

Durch das Unbewusstsein fachkultureller Zusammenhänge wird schnell übersehen, wie geschlechtliche Strukturen reproduziert werden. Historisch betrachtet durften Frauen lange Zeit nur als Ausnahme eine Universität besuchen und erlangten selbst mit hervorragendem Abschluss bei weitem nicht die Anerkennung, die Männer zuteilwurde (zum Beispiel Lise Meitner; siehe Paulitz, 2012, S. 169). Die gerade mal gut 100jährige Geschichte des für Frauen geöffneten Studiums (Mertens, 1989) prägt entsprechend die heutige Wissenschaftslandschaft wie genannt: je höher die Positionen, desto weniger Frauen sind dort anzutreffen. Besonders in den MINT-Fächern² wird deutlich, wie fachkulturelle Vorstellungen von Exzellenz, Objektivität und Leistung mit geschlechtlichen Zuschreibungen verwoben sind und Ungleichheiten verstärken können. Nicht nur wird Frauen schon von Kindheit an weniger Kompetenz in diesen Bereichen zugetraut und zugeschrieben, was sich wiederum in ihrer Studienfachwahl widerspiegelt (Dornick, 2024, S. 21). Es zeigt sich hier ebenso wie im Gesamtbild, dass der Anteil der weiblich besetzten Professuren (weniger als 25% in MINT) im Verhältnis geringer ist als zu den Studierenden (weniger als 33%) (Statistisches Bundesamt, 2024a, 2024b). Im vorliegenden Beitrag soll daher anhand einer Literaturanalyse diskutiert werden, welche Mechanismen geschlechtlicher Hierarchisierungen in der Organisation Hochschule vonstattengehen und in einem weiteren Schritt auf Fachkulturunterschiede im Speziellen eingegangen werden. Hierbei stellt sich auch die Frage, inwieweit der Blick auf die Fachkulturen der Analyse der Organisation Hochschule als Vergrößerungsglas dient.

¹ Unter Geschlecht verstehen wir eine Strukturkategorie, die In- und Exklusionen verdeutlicht. Das verwendete binäre Verständnis von Geschlecht ist

dabei keineswegs Abbild der Realität und stellt somit kein erschöpfendes Bild von Geschlecht dar.

² MINT = Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft, Technik

2 Methodik

Zur Erhebung und Darstellung genannter Fachliteratur wurde die Methode der systematischen Literaturrecherche in Anlehnung an Wetterich und Plänitz (2021) angewandt. Hierzu wurden im Zeitraum Juni bis Juli 2025 auf den Datenbanken von „GESIS“ und „Google Scholar“ nach den Suchbegriffen „fachkultur“ und „geschlecht“, „geschlecht“ und „hochschulstruktur“ sowie „geschlecht“ und „wissenschaft“ gesucht. Tabelle 1 zeigt, wie viele Suchergebnisse daraus resultierten, wobei lediglich „Ersttreffer“ aufgelistet sind, d.h. Suchresultate, die mehrfach vorkamen, wurden nur einmal gezählt.

Es wurde sich bei der Suche gezielt auf deutschsprachige Literatur fokussiert. Eine Ausweitung auf englischsprachige Texte hätte den Umfang dieses Beitrags gesprengt. Eine zeitliche Eingrenzung wurde nicht vorgenommen, da sowohl die Hochschulforschung als auch die Frauen- und Geschlechterforschung, damit also auch die feministische Hochschulforschung, etwa im Laufe der 1980er Jahre aufkam und ein aktiver Ausschluss älterer Werke ein inhaltliches Versäumnis hätte darstellen können.

Die Auswahl der Literatur erfolgte in zwei Schritten. In einem ersten Durchgang wurden Treffer anhand der verwendeten Titel sowie der Abstracts aussortiert. In einem zweiten Schritt wurde die Literatur inhaltlich tiefergehend betrachtet und eine fokussierte Auswahl anhand der Fragestellung getroffen. Berücksichtigt wurden dementsprechend Arbeiten, die Fachkulturen und/ oder Organisationssysteme in der Hochschule mit einem Gender-Aspekt untersuchen und dabei die Ebene des akademischen Mittelbaus sowie der Professuren und Hochschulleitungen be-

leuchten. Aufgrund des organisationalen Fokus wurden Perspektiven auf studentische Strukturen und Fachkulturen nicht berücksichtigt. Ebenso wurden jene Betrachtungen auf Schule und (hochschulische) didaktische Konzepte oder auch Perspektiven ohne Gender-Bezug ausgeschlossen.

Die einbezogenen Publikationsarten waren schließlich Monografien, Sammelbände, Sammelband- und Konferenzbeiträge sowie Zeitschriftenartikel. Bei den gefundenen Sammelbänden wurde sich ausschließlich auf relevante Einzelbeiträge fokussiert. Aufgrund fehlenden Zugriffs konnten nicht alle Suchtreffer in die engere Auswahl einbezogen werden, die auf den ersten Blick passend gewesen wären. Dies betraf 11 Treffer. Die Gesamtauswahl einbezogener Literatur beträgt daher 23.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Literaturrecherche vorgestellt. Diese wurden in drei Hauptthemen strukturiert: „*doing gender*“ und „*doing science*“, *Hochschule als „gendered organizations“* sowie *Unterschiede in den Fachkulturen*. Die Strukturierung ist nicht als trennscharf zu verstehen, da dem Thema immanent ist, dass es zwischen den Teilbereichen Interdependenzen gibt. Im Abschnitt „*doing gender*“ und „*doing science*“ geht es inhaltlich um die Texte, die sich zum einen mit spezifischen Fachdisziplinen befassen, zum anderen aber auch um Texte, die Gender in der Wissenschaft als solche diskutieren. Im darauffolgenden Abschnitt *Hochschule als „gendered organizations“* werden Texte beleuchtet, die Hochschulen insgesamt betrachten. Im letzten Hauptabschnitt *Unterschiede in den Fachkulturen* werden Texte über fachkulturelle Vergleiche vorgestellt.

Die Ergebnisse werden abschließend zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1 Darstellung des Suchvorgangs.

Datenbank	Verwendete Suchbegriffe	Anzahl gefundener Titel	Einbezogene Titel
GESIS	"fachkultur" + "geschlecht"	96	12
Google Scholar	"fachkultur" + "geschlecht"	2.640	7
GESIS	"geschlecht" + "hochschulstruktur"	15	1
Google Scholar	"geschlecht" + "hochschulstruktur"	257	0
GESIS	"gender" + "wissenschaft"	3.007	1
Google Scholar	"gender" + "wissenschaft"	~ 259.000	2
Gesamt			23

3 “Doing gender” und “doing science”

Während ausgehend von den Gender Studies die Verwobenheit von Geschlecht und Wissenschaft betont wird, ist in anderen Fachdisziplinen eine Abgrenzung im Sinne eines geschlechtsneutralen Faches zu beobachten (siehe hierzu im Folgenden Greusing, 2018). Dieses in der Forschungsliteratur viel diskutierte Thema wird hier unter dem Titel „doing gender“ in Anlehnung an West und Zimmermann (1987) und daran anspielend mit „doing science“ verknüpft wird. Deutlich wird dabei, dass Grenzziehungen zwischen den Geschlechtern vorgenommen werden, die zu geschlechtlich strukturierten Machtverhältnissen und Diskriminierungen führen, vor allem in technikwissenschaftlichen Bereichen. So zeigt Greusing (2018, 2022) anhand problemzentrierter Interviews, dass Frauen in den vermeintlich geschlechtsneutralen Ingenieurwissenschaften als Ausnahmen wahrgenommen und konstruiert werden, die aufgrund ihres mangelnden Interesses an Mathematik außerhalb des Feldes, Männer dagegen innerhalb verortet werden. Im Falle solcher Ausnahmen wird deutlich, wie eine vermeintlich neutrale, in Wahrheit jedoch ‚vermännlichte‘ Kompetenz zugeschrieben wird und Frauen auf diese Weise zu „geschlechtliche[n] Mischwesen“ (Greusing, 2018, S. 188) konstruiert werden. Greusings Ausführungen zeigen auf, dass Frauen nicht gleichzeitig als weiblich UND Ingenieurin wahrgenommen werden, sondern stets nur eins von beiden sein können. Auf diese Weise wird das hegemonial männlich geprägte Feld erhalten (ebd.) und zwei Klassen vergeschlechtlichen Habitus gebildet (Greusing, 2018, S. 189). Dies bringt unweigerlich internalisierte geschlechtlich geprägte Hierarchien mit sich, die eine tatsächliche Chancengleichheit verhindern. Die gleichzeitige Auffassung, das Feld sei geschlechtsneutral, führt so zu einer Maskierung der Ungleichheitsmechanismen und Verfestigung der feldinhärenten Machtverhältnisse. Greusing versteht dies als Strategie einer „rhetorischen Modernisierung“ (Wetterer, 2005), um das Feld unter „männlicher Herrschaft zu erhalten“ (Greusing, 2018, S. 198). Greusing verweist zudem darauf, dass Ingenieur:innen als „weiß, deutsch und nicht behindert“ (Greusing, 2022, S. 187) verortet werden und damit nicht nur geschlechtliche, sondern intersektionale Ausschlüsse einhergehen.

Auch Beaufaÿs (2003) kommt anhand ihrer ethnographischen und qualitativen Untersuchungen zu ähnlichen Feststellungen, nämlich, dass Leistung als rationaler und vertrauenswürdiger Maßstab unabhängig des Ansehens der Personen herangezogen wird, dies jedoch in Wahrheit nur ein Mythos darstellt (Beaufaÿs, 2003, S. 247), da Geschlecht unbewusst offenbar als Herabstufungsmodus funktioniere (ebd., 248). Allerdings stellt Beaufaÿs dabei heraus, dass das wissenschaftliche Feld nicht aufgrund des Geschlechts an sich männlich dominiert sei, sondern weil die dominierenden Akteure „mit einem Habitus ausgestattet sind, dem ein männlicher Wissenschaftler am nächsten kommt“ (Beaufaÿs, 2003, S. 254; Beaufaÿs & Kraus, 2005, S. 97). Auch anhand dessen wird die oben genannte „männliche Herrschaft“ erhalten und reproduziert (ebd.). Wissenschaftliche Akteure sollten daher nicht als neutrale Forschende verstanden werden, die sich auf eine verdiente Position vorgearbeitet haben, sondern die spezifische „illusio“ sei es, die Personen dahinbringt (Beaufaÿs & Kraus,

2005, S. 98). Die Wissenschaft ist damit tief geprägt von Machtverhältnissen und sozialer Ungleichheit.

Auch in jüngeren Publikationen zeigt sich, beispielsweise bei Dollsack (2022), eine rhetorische Modernisierung, die von Gleichheit zwischen Männern und Frauen ausgeht, so Misserfolg individualisiert (Dollsack, 2022, S. 95) und strukturelle Geschlechterungleichheiten marginalisiert (Dollsack, 2022, S. 94). Dollsack findet jedoch auch Beispiele in ihren qualitativen Interviews dafür, dass Reflexionen, die zu Änderungen im wissenschaftlichen Feld führen können, durchaus bereits vorhanden sind und es Personen gibt, die über die (Eigen-)Reflexion hinaus Strategien entwickeln, um solche Veränderungsprozesse herbeizuführen (Dollsack, 2022, S. 103). Besonders wichtig ist hierbei, Reflexionen zu Geschlecht bei den Individuen einerseits, aber auch den Fachkulturen und den Institutionen andererseits hervorzurufen (Dollsack, 2022, S. 104), um der Marginalisierung der strukturellen Geschlechterungleichheiten in der Wissenschaft entgegenwirken zu können.

Ähnliches betont auch Erlemann (2018), hier in Bezug auf die physikalischen Fachkulturen. Erlemanns Untersuchungen im Projekt „genderDynamiken“ zeigen, dass durch Führungspersonen eingebrachte Vergeschlechtlichungen besonders wirksam und auf die gelebte Geschlechterkultur besonders einflussreich sind (Erlemann, 2018, S. 19), so dass positive Haltungen gegenüber Gleichstellungsmaßnahmen da zu verzeichnen sind, wo ein ausgeglichenes Geschlechterverhältnis angestrebt wird (Erlemann, 2018, S. 20). Obwohl die Geschlechterungleichheiten weniger individualisiert, sondern eher auf struktureller Ebene verortet wurden (Erlemann, 2018, S. 19), konnten trotzdem Beispiele dafür gefunden werden, dass sowohl Männer als auch Frauen Gleichstellungsmaßnahmen speziell für Frauen kritisch betrachten, da einerseits Ausschlüsse befürchtet (bei Männern) und andererseits Gleichstellungsmaßnahmen als Fremdbestimmung empfunden wurden (bei Frauen) (Erlemann, 2018, 20f.).

Neben diesen Faktoren, die zu Ablehnung von Gleichstellungsmaßnahmen führen, zeigt Klammer (2019) anhand qualitativer Interviews, dass Gleichstellungspolitik auch als Konkurrenz zur „Bestenauswahl“ verstanden werden kann (Klammer, 2019, S. 9). Dies impliziert den Mythos, dass Frauen nicht genauso gut wie Männer sein könnten und ihnen qua Geschlecht die schlechteren Leistungen inne lägen. Diese Annahme zeigt sich nicht nur in jenen Fächern, die messbar mehr Männer vorzuweisen haben, sondern ist unabhängig der Fachzugehörigkeit vertreten (ebd.).

Die ethnographischen Untersuchungen Petschicks (2014) zeigen, dass der Anspruch in der Wissenschaft, ständig verfügbar sein zu müssen, kaum mit zeitintensiven Hobbys, geschweige denn Care-Verantwortung vereinbar ist. Die Autorin geht davon aus, dass es jedoch Hobbys gibt, die das Idealbild des Wissenschaftlers unterstreichen und so der Mythos des uneingeschränkt und aufopfernd Forschenden erhalten bleibt (Petschick, 2014, S. 51). Auch, dass Leistung nicht anerkannt wird und eine gewisse Risikobereitschaft von Nöten ist, zeigt die Autorin auf (ebd., 51f.). Dies betont, dass intersektionale Diskriminierungen aufgrund der vorherrschenden Erwartungshaltung in der Wissenschaft üblich sind.

Guthoff (2013) stellt anhand qualitativer Interviews für das Fach Philosophie heraus, dass der Habitus des Feldes als männlich bezeichnet werden kann, weil einige Aspekte, auf die es im Fach ankommt, nicht geschlechtsneutral verfasst sind (Guthoff, 2013, S. 265). Solche Aspekte sind beispielsweise fachspezifische Vorstellungen von Qualität, Entschiedenheit und Stimmung (ebd.), sodass sich der Habitus des Faches dahingehend androzentrisch und sexistisch konstituiert (Guthoff, 2013, 265f.). Paradoxerweise wird in der Philosophie davon gesprochen, dass das (eigene) Geschlecht irrelevant sei, gleichzeitig seien Akteure der Philosophie allerdings für gewöhnlich keine Frauen (Guthoff, 2013, S. 266). Die Autorin empfiehlt daher an einer Transformation des Feldhabitus zu arbeiten und über das Doing Gender im Fach zu reflektieren (Guthoff, 2013, S. 270).

Das von Greusing (2018) beschriebene mangelnde Mathematikinteresse wird auch von Dornick (2024) thematisiert. Dornick legt dar, dass dieses Motiv auf hochschulpolitischen Webseiten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)³ dominant ist und daher die Förderung der „Begeisterung“ ein zentrales Motiv darstellt (Dornick, 2024, 23f.). Es werden bei den Darstellungen auf den Webseiten Fröhlichkeit und Aufbruchstimmung suggeriert, die nicht der Realität entsprechen, denn stattdessen prägen Diskriminierungen den Alltag (Dornick, 2024, 24f.). Ausgehend von Keitel (2009, S. 13) ist dies nicht verwunderlich, war es in diesen Fachkulturen lange Zeit selbstverständliche Annahme, dass Frauen für diese Fächer naturgegeben unbegabt und zu wenig intelligent seien. Und auch heute, so Keitel, wird bei formal gleichem Zugang nicht dieselbe Chancengleichheit zuteil, da Mädchen und Frauen noch immer Defizite zugeschrieben werden (Keitel, 2009, S. 14). Frauen fühlen sich daher nicht akzeptiert und ausgegrenzt (ebd.). Es herrschen damit unattraktive und nicht hinnehmbare Bedingungen, die Begeisterung deutlich erschweren und es daher laut Dornick kaum eine Lösung sein kann, marginalisierte Personen in diese diskriminierenden Fachkulturen integrieren zu wollen (Dornick, 2024, 27f.). Auch hier geht der Appell somit in Richtung Transformation der MINT-Wissenschaft hin zu diversitätssensiblen Fachkulturen (Dornick, 2024, S. 28).

Die aufgeführten Texte, die unter der Überschrift „*doing gender*“ und „*doing science*“ geführt wurden, zeigen auf, dass Wissenschaft nicht neutral, sondern vergeschlechtlicht ist. Die Akteure des Feldes vermögen zwar zu glauben, Geschlecht sei irrelevant, es zeigt sich allerdings, dass das Bild des Wissenschaftlers ein männliches ist: Wissenschaftler:innen blühen voll und ganz in der Wissenschaft auf, weder Familie noch Hobby steht ihnen dabei im Weg. Damit einher geht der Mythos der Bestenauslese, dem frauenfördernde Gleichstellungspolitiken entgegenwirken, da Frauen, die gefördert werden müssen, wohl kaum die Besten sein können. Unter dem Mantel einer rhetorischen Modernisierung, sprich, einer Rhetorik der Gleichheit (Wetterer, 2005), wird das funktionierende (männliche) System verdeckt erhalten. Das heißt, es wird zwar von Frauenförderung gesprochen, Frauen und andere margina-

lisierte Gruppen werden in Wahrheit jedoch abgeschreckt und diskriminiert. Frauen werden also rhetorisch und praktisch aus der Wissenschaft ausgeschlossen. Doing gender und doing science bedeutet somit vor allem, Männlichkeit als Aspekt von Wissenschaft zu konstruieren. Auf diese Weise werden Hochschulen und die Wissenschaft zu einer geschlechtlich (sub-)strukturierten Organisation, auf die im Folgenden Bezug genommen wird.

4 Hochschule als „gendered organization“

Wie zuvor gezeigt werden konnte, ist Hochschule geschlechtlich strukturiert. Der folgende Abschnitt befasst sich daher in Anlehnung an Acker (1990) mit Hochschulen als „gendered organizations“. Mit Blick auf die historische Entwicklung der Hochschulen in Deutschland zeigt sich, dass eine formale Öffnung für Frauen erst 1908 initiiert wurde (Ihsen, 2013, S. 238). Gegenwärtig ist dies noch immer bemerkbar, auch wenn formale Gleichstellung gegeben und offensichtlicher Ausschluss nicht mehr rechtens ist. Die tiefsitzende patriarchale Geschlechtertrennung führt bis heute dazu, dass Organisationen wie Hochschulen geschlechtlich substrukturiert sind und Frauen, je höher die Positionen sind, umso seltener anzutreffen sind: „Wissenschaft als Beruf ist Männerdomäne geblieben.“ (Hark, 2001, S. 57). Hark sieht die Ursache hierfür darin, dass sich auf die Förderung von Frauen, anstatt der Analyse und Bekämpfung des Habitus inkorporierter Männlichkeit an Hochschulen fokussiert wurde. Auf diese Weise wurden tradierte Geschlechtszuschreibungen fortgeschrieben, statt sie abzubauen (Hark, 2001, S. 58). Durch die Implementierung von Frauenförderprogrammen wurden also weibliche Defizite betont, anstatt die bestehenden Strukturen zu kritisieren und umzubauen, sodass im Umkehrschluss noch immer Wissenschaft mit männlichem Geschlecht in Verbindung gebracht wird und so, laut Hark, der immanente Widerspruch von Wissenschaft und „Weiblichkeit“ reproduziert wird (ebd., 59). Hark fordert daher bereits 2001, den Habitus und die Mentalität innerhalb der Fachkulturen in den Fokus zu nehmen und Frauenförderung innerhalb dessen zu konzipieren (Hark, 2001, 59f.).

Bezugnehmend auf technische Fachkulturen berichtet Ihsen (2013) darüber, wie diese zu einer männlichen „Monokultur“ gemacht wurden und wie daran beharrlich festgehalten wird. Ihsen betrachtet diese Fachkultur als autopoietisches Subsystem, in der sich spezifische Kommunikationsformen (Habitus) herausbilden, die identitätsstiftend wirken und offizielle wie inoffizielle Regeln („hidden agenda“) produzieren, sodass sich das System aufrechterhält, indem sich die Mitglieder daran anpassen müssen (Ihsen, 2013, S. 239). Trotz des Ziels, Frauen besser zu integrieren, lassen sich daher immer noch traditionelle Spielregeln vorfinden, die Frauen aus den Technikwissenschaften fernhalten oder aussteigen lassen (Ihsen, 2013, 241; 244). In einem Beitrag von Stauche und Kusche (2025) sprechen Frauen diese Kommunikationsformen an und schildern ihre Erfahrungen in jenen männlich geprägten Fachkulturen. Die geschilderten „Machtspiele“ ver-

³ Das Ministerium trägt seit Mai 2025 den Namen Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR).

deutlichen, dass Hochschule wohl kaum als (geschlechts-) neutraler Ort verstanden werden kann (Stauché & Kutsche, 2025, S. 70).

Erlemann (2024) stellt ebenso heraus, dass Frauen und unterrepräsentierte Gruppen, beispielsweise Migrant:innen, größere Schwierigkeiten haben, anerkanntes Mitglied der Fachcommunity zu werden und sich dies im vertikalen Segregationsprozess („gläserne Decke“) zeigt (Erlemann, 2024, 145f.). Sie zeigt Beispiele auf, wie dies im alltäglichen Geschehen passiert, nämlich, indem technikassoziierte Aufgaben eher an männliche, sozialassoziierte Aufgaben eher an weibliche Kolleg:innen übertragen (Erlemann, 2024, 148f.) oder auch Geschlechterhierarchien in Meetings konstruiert werden (Erlemann, 2024, S. 150).

Geraht werden die vorgestellten Ergebnisse zusätzlich durch die Tatsache, dass Kortendiek et al. (2021) auf allen Stausebenen, aber eben auch insbesondere auf der Ebene von Professuren einen Gender Pay Gap in Nordrhein-Westfalen nachweisen konnten. Dieses Ergebnis ist auf die gesamte Bundesrepublik Deutschland übertragbar und spiegelt die vielfältigen Diskriminierungen, denen Frauen in der Wissenschaft ausgesetzt sind, anhand von Besoldungszahlen wider (Kortendiek et al., 2021, 273ff.).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Geschlecht als soziale Strukturkategorie in die Hochschule hineinwirkt und deshalb Hürden für Frauen in der Wissenschaft und insbesondere den MINT-Fächern bestehen (Paulitz, 2012, S. 170), unter anderem, weil wissenschaftliche Fakten durch Alltagswissen geschlechtlich aufgeladen sind (Paulitz, 2012, S. 172). Hochschule kann und darf deshalb nicht als neutrale Organisation bzw. neutraler Ort verstanden werden, da die Literatur eindeutig belegt, wie geschlechtliche Machtstrukturen wirken und so Männer bevorzugen und fördern.

5 Unterschiede in den Fachkulturen

Entsprechend der Forschungsfrage, welche geschlechtlichen Strukturen anhand fachkultureller Eigenschaften erkennbar werden und welche Konsequenzen dies aus organisationaler Sicht hat, bleibt zuletzt die Frage offen, welche Ergebnisse mit Blick auf die Fachkulturen an sich vorzufinden sind. In den vorherigen Abschnitten wurden dahingehend bereits einige Aspekte angesprochen, im Folgenden sollen weitere Punkte hinzugefügt werden. Wurden zuvor zwar bereits Erkenntnisse einzelner Fachkulturen einbezogen, werden hier speziell Texte vorgestellt, die Fachkulturen direkt miteinander vergleichen.

Zeigen dazu die Ergebnisse bisher, dass *doing gender* und *doing science* dazu neigen, Ausschlussmechanismen, insbesondere in den „harten“ Wissenschaften mit sich zu bringen, belegen tiefergehende Analysen die unterschiedliche Ausgestaltung und verschiedenen Umgangsweisen mit Geschlecht. In der „Härte der Feldarbeit“ (Heintz, Merz & Schumacher, 2004, S. 266) der Botanik an einer Schweizer Hochschule beispielsweise präsentiert sich ein Heroismus, der den Wissenschaftlern als Aufwertung eines weiblich verstandenen Wissenschaftsfeldes dient, während er für die Wissenschaftlerinnen legitimierend auf ihre Forschungstauglichkeit wirkt (Heintz et al., 2004, 265ff.). In der Architektur dagegen werden Frauen als Personen mit falschem Geschlecht verstanden, sodass hier kein zufrie-

denstellendes Zusammenwirken von Geschlechtlichkeit und Beruflichkeit möglich zu sein scheint (ebd., 262f.), ähnlich wie das Bild sich auch für die Technik- und Naturwissenschaften bereits formte. Zusammenfassend stellen Heintz et al. anhand ihrer ethnographischen Fallstudien und den durchgeführten Interviews fest, dass Wissenschaftlichkeit und Geschlechtlichkeit in den jeweiligen Disziplinen unterschiedlich miteinander verflochten sind, sodass Geschlecht nicht immer einen omnirelevanten Strukturierungsfaktor darstellt (Heintz et al., 2004, S. 270). Die Autorinnen vertreten daher die These, dass es eine „De-Institutionalisierung der Geschlechterdifferenz“ gäbe (Heintz et al., 2004, S. 69, 2007, S. 277), sodass organisatorische Rahmenbedingungen Interaktionsprozesse derart beeinflussen, dass in wissenschaftlichen Verfahren kaum noch rein geschlechtliche Aspekte berücksichtigt werden können und dürfen, sondern die zunehmende Strukturierung dieser Verfahren dies reduziert (Heintz et al., 2004, S. 69). Sie schlussfolgern, dass Ungleichbehandlung vor allem in offenen, wenig strukturierten Situationen vorkommt (Heintz et al., 2004, S. 280), sodass geschlechtlich geprägte Leistungsbeurteilung vor allem in Fachkulturen vorkommt, die keine standardisierten wissenschaftlichen Verfahren anwenden (können) (Heintz et al., 2004, S. 280, 2007). Sie zeigen zudem, dass Berufsbilder stark durch die Außenwahrnehmung geprägt sind, weshalb Architektur mit männlichem, Pharmazie dagegen mit weiblichem Image bekannt sind und sich dies kaum aufbrechen lässt (Heintz et al., 2004, S. 284). Das Image von Fächern mit geringem Standardisierungsgrad ist also ein weibliches, sie werden als *soft sciences* gesehen, während jene mit hohem Standardisierungsgrad als *hard sciences* und damit „männlich“ konnotiert betrachtet werden (Heintz et al., 2007, S. 276). Daher profitieren Frauen auch in der Botanik nicht von den Bedingungen, (Heintz et al., 2007, S. 277), sodass sich abzeichnet, dass Männer im Grunde immer, ungeachtet ihrer Fachdisziplin, profitieren.

Aus anderer Perspektive untersuchen Vogel und Hinz (2004) sowie Vogel (2009a, 2009b) anhand von Leitfaden-Interviews und quantitativen Befragungen die Unterschiede zwischen verschiedenen Fächern mit Blick auf das Privatleben und die Verstrickung zu den Fachkulturen. Allgemein zeigen Vogel und Hinz (2004), dass zwar zunächst die Benachteiligungen am Anfang einer wissenschaftlichen Karriere geschlechtsunabhängig sind, Frauen jedoch schlechter gefördert und in die Hochschule integriert werden. Außerdem weisen Frauen stärkere Benachteiligung durch den Vereinbarkeitsspagat zwischen Beruf und Familie auf, die durch die Fachkulturen verstärkt werden können (Vogel & Hinz, 2004, S. 128). Es zeigt sich dabei, dass Männer in der Mathematik durch den Rückhalt ihrer Frauen für die Wissenschaftskarriere freigestellt sind und traditionelle Rolleneinteilungen nicht hinterfragt werden (Vogel, 2009a, S. 237, 2009b, S. 48). Dies belastet Frauen in der Mathematik demnach zusätzlich, sodass die Karrierechancen unterschiedlich gestaltet sind und Frauen sich hier besonders der Doppelbelastung ausgesetzt sehen. Personen aus den Sozialwissenschaften stehen den traditionellen Rollenbildern kritischer gegenüber, sodass sich Männer zwar stärker an der Care-Arbeit beteiligen, Frauen jedoch auch hier noch immer größere Verpflichtungen vorzuweisen haben (ebd.). Insgesamt sind die

Chancen daher zwischen Frauen und Männern in den Sozialwissenschaften näher beieinanderliegend als jene der Frauen und Männer in der Mathematik (Vogel, 2009a, S. 238) – Männer in der Mathematik sind damit in der untersuchten Gruppe am privilegiertesten (Vogel, 2009b, S. 48). Damit zeigen die Ergebnisse Vogels, dass im Hintergrund der Fachkulturen auch private Aspekte berücksichtigt werden müssen und so ein gespaltenen Habitus vorliegt, der wiederum die soziale Ungleichheit in der Forschung beeinflusst (Vogel, 2009a, S. 246, 2009b, 54f.). Wenn Männer also mehr Care-Arbeit übernehmen würden, hätten auch Frauen mehr Zeit für die Wissenschaft. Allerdings sehen Vogel und Hinz hier eher Potenzial in Fachkulturen mit weniger konventionellen Vorstellungen von häuslicher Verantwortung (Vogel & Hinz, 2004, S. 129; siehe auch Vogel, 2009b, S. 56), das heißt, es sind eher die Geistes- und Sozialwissenschaften als die MINT-Fächer, die dieses Potenzial tragen. Da die häusliche Sphäre jedoch für Frauen in allen Fachkulturen eher behindernd wirkt, reproduziert sich die männliche Herrschaft in der Wissenschaft, weil Männer für diese freigestellt sind (Vogel, 2009b, 54f.). Frauen dagegen sehen sich eher einer Verdrängung ausgesetzt (siehe auch Stauche, 2025; im Erscheinen). Ein Appell wäre daher, innerhalb der Wissenschaft stärker über Geschlechtshierarchien aufzuklären und so unbewusste Mechanismen abzubauen (Vogel & Hinz, 2004, S. 128). Dass Genderstereotype sowohl in den Geistes- und Sozialwissenschaften als auch in den Natur- und Technikwissenschaften reproduziert werden, bestätigen Bütow et al., wobei sie auch anhand ihres ethnografischen und qualitativen Forschungsmaterials Unterschiede zwischen den jeweiligen Fächergruppen aufspüren konnten (Bütow, Eckert & Teichmann, 2016, S. 131). Sie resümieren jedoch, dass *doing gender while doing science* eine „zentrale Praktik der De-Thematisierung von Gender in Fachkulturen“ (Bütow et al., 2016, S. 186) ausmacht und das soziale Feld Wissenschaft somit durchgängig durch die Strukturkategorie Geschlecht durchzogen ist. Auch wenn laut Heintz et al. (2004, S. 270) Geschlecht nicht omnirelevant ist, so ist es doch omnipräsent, auch wenn das Feld durch die Akteur:innen als neutral inszeniert wird (Bütow et al., 2016, S. 186). Bütow et al. sprechen dabei von einer Überkreuzung eines vergeschlechtlichen Rollenvorbilds für Studierende einerseits, als Angehörige von neutral verstandenen Fachkulturen andererseits (Bütow et al., 2016, S. 186), was jedoch wenig reflektiert würde und mit Blick auf die Aufstiegs-muster zu einer generationalen Weitergabe führe (ebd., 187). Sowohl implizit als auch teilweise explizit, so die Autorinnen, wird vom Männlichen als das Normale, vom Weiblichen als das Besondere ausgegangen (Bütow et al., 2016, S. 186). Sie bestätigen damit die bereits erwähnten Ergebnisse von Heintz et al. (2004). Es wird resümiert, dass in den Fachkulturen eine sich selbst reproduzierende Geschlechterordnung vorherrscht, die „nicht einfach durch (oft zeitlich begrenzte) Programme“ durchkreuzbar oder demokratisierbar sei (Bütow et al., 2016, S. 197). Schließlich zeigt sich, dass es zwar Unterschiede in Art und Umfang der Vergeschlechtlichungen innerhalb der Fachkulturen gibt, jedoch alle Fachkulturen diese gemein haben. Sämtliche Fachkulturen sind damit auf unterschiedliche Weise Durchdrungen von Geschlecht und die

vorherrschenden Wahrnehmungs-, Denk- Wertungs- und Handlungsweisen müssen stets als vergeschlechtlicht und damit nicht neutral verstanden werden. Die Untersuchungen der Fachkulturen bestätigen und erweitern somit die vorhergehenden Ergebnisse, dass Wissenschaft und die Organisation Hochschule nicht geschlechtsneutral sind und Männer Bevorzugung erfahren.

6 Zusammenfassung und Fazit

Die untersuchte Literatur konnte über einen Zeitraum von rund 25 Jahren aufzeigen, dass trotz formal gleichen Voraussetzungen Wissenschaft für Frauen schwieriger zugänglich ist als für Männer. Noch immer herrschen Vorurteile über die Kompetenzen von Frauen vor, die ihre Karrierechancen in der Wissenschaft und insbesondere MINT-Fächern negativ beeinflussen. Gleichzeitig sind Männer als Prototyp eines Wissenschaft „machenden“ Menschen im klaren Vorteil. Unter dem Deckmantel einer rhetorischen Modernisierung, das heißt, unter der Vorgabe von Gleichstellungsmaßnahmen, werden Frauen zwar im Vordergrund gefördert, hintergründig bleiben jedoch noch immer Männerbünde erhalten und männliche Herrschaft wird kaum sichtbar reproduziert. Wissenschaft wird noch immer kaum mit (weiblichem) Geschlecht zusammengedacht, obwohl persistierende Mythen über (männliche) Heldenhaftigkeit (Heintz et al., 2004; siehe auch Erlemann, 2018), „männliche“ Kompetenz (Greusing, 2018) und vermeintliche Neutralität (Bütow et al., 2016; Guthoff, 2013) Aufmerksamkeit finden. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl in der Wissenschaft an sich, als auch auf Organisations- und Fachkulturebene Vergeschlechtlichungs- und damit Bevorzugungs- bzw. Benachteiligungsprozesse stattfinden. Die Analyse der Fachkulturen zeigt dabei insbesondere die Unterschiede auf, die sich bei diesen Prozessen finden lassen. Vogel (2009a, 2009b) beispielsweise verweist dazu mit Blick auf die häusliche Sphäre auf die Differenz zwischen Sozialwissenschaften und Mathematik und das Potenzial einer fachkulturellen Annäherung seitens der Mathematik an die Sozialwissenschaften.

Es sind jedoch weitere Analysen zwischen den Fachkulturen notwendig, um herausarbeiten zu können, welche Prozesse und Merkmale zu geringeren geschlechtlich markierten Hierarchien führen oder welche diese verstärken. Wie bereits Hark (2001) forderte, sollte sich auf die Analyse des Habitus inkorporierter Männlichkeit an Hochschulen und damit insbesondere den Fachkulturen fokussiert werden, um Ungleichheitsverhältnisse zu demaskieren, Geschlechterhierarchien abzubauen und Gleichstellung zu fördern. Das Plädoyer gilt daher einer weiterführenden feministischen Hochschulforschung, die Fachkulturen als Vergrößerungsglas der Hochschule als „gendered organization“ versteht und Fachkulturen somit fokussierter als Puzzleteil geschlechtlich substrukturierter Hochschulen beleuchtet. Hierbei sollten den Fachkulturen immanente Strukturen näher betrachtet werden, um männlich konnotierte Prägungen ausfindig machen zu können und so Ansatzpunkte zu finden, solche Vergeschlechtlichungen abzubauen. Auch Untersuchungen jenseits zweigeschlechtlicher Perspektiven sind dabei erstrebenswert, um Aussagen zur Vielschichtigkeit der geschlechtlichen Substrukturierung treffen zu können.

7 Limitationen

In zukünftigen Literatursuchen sollten weiterführende Suchbegriffe und -kombinationen, Suchbegriffe in englischer Sprache sowie internationale Literaturdatenbanken verwendet werden, um unter anderem Vergleiche zu anderen Hochschulsystemen herstellen zu können.

8 Literatur

- Acker, J. (1990). Hierarchies, Jobs, Bodies: A Theory of Gendered Organizations. *Gender & Society*, 4(2), 139–158.
- Beaufaÿs, S. (2003). *Wie werden Wissenschaftler gemacht?* Bielefeld: transcript Verlag. Verfügbar unter: DOI: 10.25595/201
- Beaufaÿs, S. & Krais, B. (2005). Doing Science - Doing Gender. Die Produktion von Wissenschaftlerinnen und die Reproduktion von Machtverhältnissen im wissenschaftlichen Feld. *Feministische Studien : Zeitschrift für interdisziplinäre Frauen- und Geschlechterforschung*, 23(1), 82–99.
- Bütow, B., Eckert, L. & Teichmann, F. (2016). *Fachkulturen als Ordnung der Geschlechter*. Opladen, Berlin, Toronto: Verlag Barbara Budrich.
- Dollsack, S. (2022). Geschlechterwissen von Lehrenden in MINT-Fächern – Rekonstruktionen von Einstellungsmustern und Handlungsoptionen. In C. Rudolph, A. Reber & S. Dollsack (Hrsg.), *Geschlechtergerechtigkeit und MINT* (S. 87–106). Opladen: Verlag Barbara Budrich.
- Dornick, S. (2024). Mehr Begeisterung für MINT? Plädoyer für Vielfalt und Diversitätssensibilität in MINT-Fachkulturen. In S. Dreier & D. Hillebrand-Ludin (Hrsg.), *(Un-)Sichtbarkeiten: Diversität an Hochschulen*. Leipzig: Koordinierungsstelle Chancengleichheit Sachsen (KCS).
- Erlemann, M. (2018). Fachkulturen und Geschlecht in den Natur- und Technikwissenschaften - Forschungsergebnisse am Beispiel der physikalischen Fachkulturen. In J. Dehoff-Zuch & L. Suhrcke (Hrsg.), *Schriftenreihe der Hochschule Emden/Leer* (Bd. 27, S. 3–53). Emden: Hochschule Emden/Leer.
- Erlemann, M. (2024). Gender und Diversity in der Physik—Beiträge der feministischen Fachkulturforschung zur Physik. In S. Dornick & P. Lucht (Hrsg.), *Gender und Diversity in Natur-, Technik- und Planungswissenschaften* (S. 141–158). Berlin: de Gruyter.
- Greusing, I. (2018). „Wir haben ja jetzt auch ein paar Damen bei uns“. <https://doi.org/10.25595/1324>
- Greusing, I. (2022). „Es ist einfach die Mathematikhürde“ – Interdependenz von Männlicher Herrschaft und Heteronormativität im sozialen Feld der Ingenieurwissenschaften. In C. Rudolph, A. Reber & S. Dollsack (Hrsg.), *Geschlechtergerechtigkeit und MINT*. Opladen: Verlag Barbara Budrich.
- Guthoff, H. (2013). *Kritik des Habitus. Zur Intersektion von Kollektivität und Geschlecht in der akademischen Philosophie*. Bielefeld: transcript Verlag.
- Hark, S. (2001). Der "männliche" Wissenschaftskörper und die Frauenförderung - Paradoxien eines unlauterhaltbaren Einstiegs. In C. Batisweiler, E. Lembeck & M. Jansen (Hrsg.), *Geschlechterpolitik an Hochschulen: Perspektiven zwischen Frauenförderung und Gender Mainstreaming* (S. 57–65). Opladen: Leske + Budrich.
- Heintz, B., Merz, M. & Schumacher, C. (2004). *Wissenschaft, die Grenzen schafft*. Bielefeld: transcript Verlag.
- Heintz, B., Merz, M. & Schumacher, C. (2007). Die Macht des Offensichtlichen: Bedingungen geschlechtlicher Personalisierung in der Wissenschaft. *Zeitschrift für Soziologie*, 36(4), 261–281.
- Huber, L. (1991). Fachkulturen: über die Mühen der Verständigung zwischen den Disziplinen. *Neue Sammlung*, 31(1), 3–24. Verfügbar unter: <https://pub.uni-bielefeld.de/record/1781659>
- Ihsen, S. (2013). Der Ingenieurberuf: Von der traditionellen Monokultur zu aktuellen gender- und diversityrelevanten Perspektiven und Anforderungen. *Arbeit*, 22(3), 236–246.
- Keitel, C. (2009). Geschlechtergerechtigkeit und männlich dominierte Fachkulturen in Mathematik und Naturwissenschaften. In S. Andresen, M. Koreuber & D. Lüdke (Hrsg.), *Gender und Diversity: Alpträum oder Traumpaar?* (S. 11–18). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Klammer, U. (2019). Zwischen Vorschriften, Anreizen und Rollenbildern: Gleichstellungsbezogene Handlungsorientierungen und Handlungsweisen von Professor/-innen. In N. Burzan (Hrsg.), *Komplexe Dynamiken globaler und lokaler Entwicklungen. Verhandlungen des 39. Kongresses der Deutschen Gesellschaft für Soziologie in Göttingen 2018* (Bd. 39).
- Kortendiek, B., Mense, L., Beaufaÿs, S., Bünnig, J., Hendrix, U., Herrmann, J. et al. (2021). *Gender Pay Gap und Geschlechter(un)gleichheit an Hochschulen* (Jahrbuch geschlechterbezogene Hochschulforschung). Wiesbaden: Springer VS.
- Liebau, E. & Huber, L. (1985). Die Kulturen der Fächer. *Neue Sammlung*, 25(3), 314–339. Verfügbar unter: <https://pub.uni-bielefeld.de/download/1781591/2313362/OCT2591.pdf>
- Mertens, L. (1989). Die Entwicklung des Frauenstudiums in Deutschland bis 1945. *Aus Politik und Zeitgeschichte*, 28. Verfügbar unter: <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/archiv/534903/die-entwicklung-des-frauenstudiums-in-deutschland-bis-1945/>
- Paulitz, T. (2012). Die Geschlechter der Wissenschaft: Strukturen, Kulturen und Wissen. In S. Maasen, M. Kaiser, M. Reinhart & B. Sutter (Hrsg.), *Handbuch*

- Wissenschaftssoziologie* (S. 163–175). Wiesbaden: Springer VS.
- Petschick, G. (2014). Einflussfaktoren auf die Karrieren von jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Ethnographische Untersuchungen von in den Naturwissenschaften Promovierenden. In B. Langfeldt & A. Mischau (Hrsg.), *Strukturen, Kulturen und Spielregeln. Faktoren erfolgreicher Berufsverläufe von Frauen und Männern in MINT*. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft.
- Statistisches Bundesamt (2024a). Anzahl der Studierenden in MINT-Fächern in Deutschland nach Geschlecht in den Wintersemestern von 2009/2010 bis 2022/2023 [Graph]. In Statista (Hrsg.), *Statistik der Studierenden. Wintersemester 2022/2023*. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1050875/umfrage/studierende-in-mint-faechern-in-deutschland-nach-geschlecht/>
- Statistisches Bundesamt (2024b). Frauenanteil in der Professorenschaft in Deutschland im Jahr 2023 nach Fächergruppen [Graph]. In Statista (Hrsg.), *Statistik des Hochschulpersonals*. Wiesbaden. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197908/umfrage/frauenanteil-in-der-professoren-schaft-nach-faechergruppen/>
- Statistisches Bundesamt (2025). Frauenanteil an Hochschulen nach akademischer Laufbahn in Deutschland in den Jahren 2021 bis 2023. In Statista (Hrsg.). Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/249318/umfrage/frauenanteile-an-hochschulen-in-deutschland/>
- Stauche, F. (2025). The unseen girl next door: (Un-)Sichtbarkeiten von Frauen in der Wissenschaft. In J. Ackermann, A.-K. Gerlieb & A.-S. Barbutov (Hrsg.), *Wissenschaftskommunikation und Gender. Chancen und Herausforderungen der Sichtbarkeit von Wissenschaftler*innen in sozialen und klassischen Medien*. Bielefeld: transcript Verlag.
- Stauche, F. & Kusche, R. (2025). „Ich weiß gar nicht, ob das Wort im Duden steht.“ - Zum Fachkultur-Verständnis bei wissenschaftlichem Personal in Sachsen. In R. Kusche & M. Spranger (Hrsg.), *NextGen Scientific Review Vol.3. Annual Perspectives on Next Generation Science* (Bd. 3, S. 65–74). Mittweida: Hochschule Mittweida. Verfügbar unter: <https://monami.hs-mittweida.de/frontdoor/index/index/docId/15907>
- Vogel, U. (2009a). Wissenschaftskarriere, Geschlecht und Fachkultur im sozialen Feld der Hochschule – Methodologische Herausforderungen. In B. Aulenbacher & B. Riegraf (Hrsg.), *Erkenntnis und Methode. Geschlechterforschung in Zeiten des Umbruchs* (1. Aufl., S. 235–248). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Vogel, U. (2009b). Zur Doppelbödigkeit des sozialen Feldes nach Bourdieu. *GENDER – Zeitschrift für Geschlecht, Kultur und Gesellschaft*, 1(1), 46–58.
- Vogel, U. & Hinz, C. (Hrsg.). (2004). *Wissenschaftskarriere, Geschlecht und Fachkultur. Bewältigungsstrategien in Mathematik und Sozialwissenschaften*. Bielefeld: Kleine Verlag.
- West, C. & Zimmermann, D. H. (1987). Doing Gender. *Gender and Society*, 1(2), 125–151. Verfügbar unter: https://www.gla.ac.uk/0t4/crcees/files/summer-school/readings/WestZimmerman_1987_DoingGender.pdf
- Wetterer, A. (2005). Rhetorische Modernisierung und institutionelle Reflexivität. *Freiburger FrauenStudien*, 16, 75–96.
- Wetterich, C. & Plänitz, E. (2021). *Systematische Literaturanalysen in den Sozialwissenschaften*. Opladen, Berlin, Toronto: Verlag Barbara Budrich.

Künstliche Intelligenz im Studium der Sozialen Arbeit in Sachsen

Nutzungskontexte und Wissensquellen

Julia Winterlich, Markus Lohse

Kontakt: Markus Lohse, Hochschule Mittweida, lohse@hs-mittweida.de

Zusammenfassung

Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung gewinnt der Umgang mit und die Nutzung von Künstlicher Intelligenz (KI) auch im Studium der Sozialen Arbeit zunehmend an Relevanz. Die vorliegende explorative Studie widmet sich den Fragen, für welche Zwecke Studierende KI-Anwendungen nutzen und aus welchen Quellen sie sich Wissen über den Einsatz dieser Technologien aneignen.

Insgesamt beteiligten sich 208 Studierende der Sozialen Arbeit aus zwei verschiedenen sächsischen Hochschulen an der Erhebung. Die Befragung wurde im Frühjahr 2025 mithilfe eines standardisierten Onlinefragebogens durchgeführt und die Ergebnisse anschließend deskriptiv ausgewertet.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass Studierende KI aktiv aber nur punktuell in ihren Studienalltag integrieren. In Bezug auf die Nutzung zeigen sich klare Schwerpunkte: KI wird insbesondere zur Unterstützung beim Lesen und Verstehen von Texten, zur Literaturrecherche sowie beim Verfassen eigener Texte eingesetzt.

Die Auswertung zeigt außerdem, dass das meiste Wissen über KI und deren Nutzung informell erworben wird und Studierende dabei derzeit weitgehend auf selbstorganisiertes Lernen zurückgreifen. Vor allem wurde der Austausch mit Kommiliton:innen (Peers) sowie eigenständige Online-Recherche benannt. Hochschulische oder formale Lernangebote spielen bislang eine untergeordnete Rolle.

Angesichts der steigenden Relevanz digitaler Technologien gerade auch für die Berufspraxis der Sozialen Arbeit erscheint es geboten, gezielte didaktische Konzepte zur Förderung von KI-Kompetenz in der Hochschulbildung zu verankern.

Keywords: KI-Nutzung, KI-Wissensquellen, KI und Soziale Arbeit.

1 Einführung

Künstliche Intelligenz (KI) ist ein interdisziplinäres Teilgebiet der Informatik, das sich mit der Entwicklung von Systemen befasst, die in der Lage sind, kognitive Funktionen des Menschen, wie Lernen, Problemlösen und Entscheidungsfindung zu imitieren (Dietrich, 2024). KI-Systeme halten zunehmend Einzug in betriebliche Abläufe ebenso wie in die akademische Bildung und beeinflussen damit grundlegend, wie Lehre und Lernen gestaltet werden (Baumhauer, 2024). Generative Künstliche Intelligenz (KI) ist eine besondere Form der KI, die nicht nur vorhandene Daten analysiert, sondern eigenständig neue Inhalte erzeugen kann. Sie basiert auf speziellen neuronalen Netzarchitekturen, die in der Lage sind, Texte, Bilder, Musik oder andere kreative Inhalte zu generieren. Trans-

formermodelle wie GPT (Generative Pretrained Transformer) sind Beispiele für sogenannte Large Language Models (LLMs), die mit großen Mengen an Textdaten trainiert werden (Langer & Schmidt, 2024).

Im Studium spielt generative KI, insbesondere Anwendungen wie ChatGPT oder GPT-4, eine immer wichtigere Rolle und verändern dabei maßgeblich, wie Studierende lernen und ihre Studienleistungen erbringen (von Garrel & Mayer, 2025).

Damit gehen sowohl erhebliche Potenziale als auch neue Herausforderungen einher. Vor diesem Hintergrund kommt der Qualifizierung von Studierenden im ethisch verantwortungsvollen und speziell wissenschaftsadäquaten Umgang mit KI eine besondere Relevanz zu (Baumhauer et al. 2024). Daher ist es entscheidend, besser zu verstehen, wofür KI-Systeme von Studierenden im Studium aber auch privat konkret genutzt werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse können zielgerichtete Unterstützungsangebote, ethische und forschungspraktische Leitlinien oder hochschuldidaktische Weiterentwicklungen in der Hochschullehre gestaltet werden, die sowohl den verantwortungsvollen Umgang mit KI fördern als auch ihre Potenziale sinnvoll in Lernprozesse integrieren.

Zunächst wird die Forschungsfrage kontextualisiert und in den aktuellen Forschungsstand eingeordnet. Danach folgt die Darstellung des methodischen Vorgehens. Im Anschluss werden zentrale Ergebnisse präsentiert und schließlich im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Hochschulpraxis und weiterführende Forschung diskutiert.

2 Hintergrund und Zielstellung

Die Auseinandersetzung mit KI erfährt gegenwärtig im akademischen Kontext eine erhöhte Dynamik, was die Aufrechterhaltung eines umfassenden Überblicks beträchtlich erschwert. Da es sich um ein hochaktuelles Thema handelt, und nahezu wöchentlich Studien veröffentlicht werden, ist derzeit eher von einem (noch) unsystematisierten Zustand des Forschungsfeldes auszugehen. Umso wichtiger erscheint es, trotz der unübersichtlichen Forschungslage, einzelne, wenn auch oder gerade deswegen disziplinspezifische Studien voranzubringen, bevor sich übergreifenden Metastudien gewidmet wird. So fokussiert sich die hier vorliegende quantitative Untersuchung auf Sozialarbeitsstudierende.

KI-gestützte Anwendungen werden von Studierenden generell auf vielfältige Weise im Studienalltag eingesetzt (Stützer, 2022). Eine aktuelle Studie zur Akzeptanz von KI an sächsischen Hochschulen kommt zu dem Schluss, dass in Studiengängen der MINT-Fächer eine deutlich positivere Einstellung zu KI vorherrscht als in den Geistes- und Sozialwissenschaften beziehungsweise Bildungswissenschaften. Hierbei scheint die Disziplinzugehörigkeit der

Studierenden eine Rolle zu spielen. Die Nutzung von KI in Lehrveranstaltungen wird von den Studierenden mehrheitlich als sinnvoll erachtet, wobei dieser Erhebung zufolge die Hälfte den Einsatz als unkritisch sieht (ebd.). Bislang ist jedoch wenig darüber bekannt, wofür genau Studierende – hier exemplarisch an der Disziplin Sozialen Arbeit – KI-Systeme wie ChatGPT nutzen. Einzelne aktuelle Arbeiten befassen sich in dieser Hinsicht lediglich exemplarisch in erster Linie mit wissenschaftlichem Schreiben (Gabriel & Römisch 2024; Lausberg, Tosic & Feldermann, 2025).

Ein zentraler Aspekt im Kontext der Nutzung von KI-Systemen in der Hochschullehre besteht in der Berücksichtigung *von* beziehungsweise Anschlussfähigkeit *an* bereits vorhandenes Wissen *über* und Erfahrungen *mit* KI, um Lehrveranstaltungsinhalte zielgerichteter an den Bedürfnissen der Studierenden auszurichten. Derzeit scheint es sich dahingehend so zu verhalten, dass Studierende angeben, bisher keine bis wenig (Vor-)Erfahrung mit KI zu haben (Stützer, 2022). Auch qualitative Studien belegen ein – wenn überhaupt – rudimentäres Vorwissen und legen daher eine eher unreflektierte Nutzung nahe (Gabriel & Römisch, 2024). In diesem Zusammenhang ist es dennoch von Interesse, den Ursprung des Vorwissens der Studierenden im Bereich der Künstlichen Intelligenz zu ermitteln. Als Primärquellen dafür werden in erster Linie Soziale Netzwerke und Onlinemedien (54%), privates Umfeld (42%), andere digitale Lehrveranstaltungen (40%) und mit Abstand deutlich weniger ausschlaggebend berufliche Kontexte (7%) benannt (ebd.). Bei letzterem ist jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit zu berücksichtigen, dass an den akademischen Einrichtungen des Samples nur eine geringe Anzahl an Studierenden einer beruflichen (Neben-) Tätigkeit nachgeht oder vor dem Studium einer solchen nachgegangen ist.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, ein erstes empirisch fundiertes Verständnis darüber zu gewinnen, wozu genau Studierende der Sozialen Arbeit verschiedene Werkzeuge auf Basis künstlicher Intelligenz (KI) nutzen. Im Fokus steht dabei nicht nur die Bandbreite konkreter Anwendungsbereiche – etwa zur Literaturrecherche, zur Textübersetzung, zur Strukturierung wissenschaftlicher Arbeiten oder zur persönlichen Studienorganisation –, sondern auch die Frage, über welche Kanäle und Quellen sich Studierende ihr Wissen über KI aneignen.

Besonderes Interesse gilt der Erhebung jener Technologien, die bereits im Alltag Verwendung finden. Dazu zählen unter anderem Sprachassistenzsysteme (z. B. Siri, Alexa), Chatbots (z. B. ChatGPT), Navigationslösungen (z. B. Google Maps mit prädiktiven Algorithmen) sowie intelligente Assistenzsysteme im digitalen Raum.

Die Resultate der Untersuchung leisten einen Beitrag zur Illustration des aktuellen Kenntnisstands sowie der praktischen Relevanz von vor allem generativer KI im Alltag von angehenden Sozialarbeiter:innen. Daraus lassen sich potenzielle disziplinspezifische Implikationen für die Gestaltung akademischer Lehr-Lern-Szenarien sowie für bedarfsorientierte Weiterbildungsangebote im Kontext der Digitalisierung ableiten.

3 Methodik

Bei der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um eine quantitative Onlinebefragung, die an zwei Hochschulen durchgeführt wurde: der Dualen Hochschule Sachsen/Staatliche Studienakademie Breitenbrunn sowie der Hochschule Mittweida. Zielgruppe der Erhebung waren Studierende der Sozialen Arbeit in den ersten zwei Semestern. Die Befragung erfolgte anonym und freiwillig und richtete sich ausschließlich an immatrikulierte Studierende beider Einrichtungen. Zur Erhebung der Nutzung von KI im Studium und dem privaten Alltag sowie den Wissensquellen wurde ein Fragebogen eingesetzt, der sich in wesentlichen Teilen an der Studie „Künstliche Intelligenz im Studium – Eine quantitative Befragung von Studierenden in Deutschland“ von von Garrel et al. (2023) orientiert. Die dort enthaltenen Anwendungsszenarien – wie etwa das Lesen und Verstehen von Texten, die Literaturrecherche oder das Schreiben und Übersetzen – bildeten die Grundlage für die Entwicklung der entsprechenden Items. Zusätzlich zur Übernahme dieser standardisierten Kategorien wurde im Rahmen dieser Untersuchung die Nutzungsinintensität der jeweiligen Szenarien erfasst. Die Teilnehmenden bewerteten die Häufigkeit ihrer Nutzung auf einer fünfstufigen Likert-Skala (1 = Nie bis 5 = Immer). Darüber hinaus wurden die vorgegebenen Items um zusätzliche Nutzungsszenarien ergänzt. Diese Erweiterungen erfolgten unter Hinzuziehung wissenschaftlicher Expertise aus den Bereichen Künstliche Intelligenz und Mathematik, um die Relevanz und Aktualität der abgefragten Inhalte auf das Studium – insbesondere im sozialwissenschaftlichen Kontext – anzupassen. Die Datenerhebung fand im Rahmen regulärer Lehrveranstaltungen statt. Die Studierenden wurden direkt vor Ort während einer Vorlesung zur Teilnahme eingeladen. Über einen bereitgestellten QR-Code konnten sie den Online-Fragebogen mit ihrem eigenen mobilen Endgerät aufrufen und ausfüllen. Diese Vorgehensweise ermöglichte eine hohe Rücklaufquote sowie eine unmittelbare Datenerhebung im hochschulischen Kontext. Zur Sicherstellung der Verständlichkeit und inhaltlichen Validität des Fragebogens wurde im Vorfeld ein Pretest durchgeführt. Dieser ist sowohl mit Studierenden als auch mit Wissenschaftler:innen unterschiedlicher Fachrichtungen umgesetzt worden. Auf diese Weise konnten potenzielle Unklarheiten identifiziert und methodische Schwächen im Fragebogen behoben werden. Die Befragung wurde mithilfe der Umfragesoftware LimeSurvey auf Servern der Hochschule Mittweida durchgeführt. Anschließend überführten die Autor:innen die erhobenen Daten in das Statistikprogramm SPSS und werteten diese dort deskriptiv aus. Die Ergebnisse liefern erste empirisch gestützte Einblicke in die Herkunft des KI-Wissens sowie die Nutzung von Künstlicher Intelligenz im Alltag von Studierenden der Sozialen Arbeit.

4 Ergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Erhebung wurden insgesamt 208 Studierende der Sozialen Arbeit befragt. Im Durchschnitt waren sie 24 Jahre alt.

Zunächst wurde die Frage untersucht, welche spezifischen Technologien von den teilnehmenden Studierenden genutzt werden.

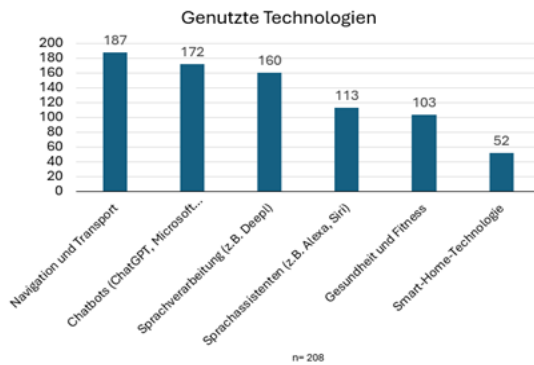


Abbildung 1: Genutzte Technologien.

Die Ergebnisse (Abb. 1) verdeutlichen, dass insbesondere KI-gestützte Anwendungen im Bereich Navigation und Transport weit verbreitet sind. 187 Studierende gaben an, Dienste wie Google Maps oder Waze regelmäßig zu nutzen, was auf eine starke Integration solcher Technologien in den Alltag hinweist.

An zweiter Stelle stehen Chatbots wie ChatGPT oder Microsoft Copilot, die von 172 Studierenden verwendet werden. Diese hohe Nutzungsrate legt nahe, dass textbasierte KI-Systeme insbesondere zur Informationsrecherche, als Lernhilfe oder zur Textgenerierung im Studium eingesetzt werden. Es konnte festgestellt werden, dass auch Sprachverarbeitungstools wie Google Translate oder DeepL eine hohe Beliebtheit aufweisen: 160 Studierende nutzen diese Technologien, was insbesondere im Kontext internationaler Studieninhalte und fremdsprachiger Literatur nachvollziehbar ist.

Zudem werden Sprachassistenten (z. B. Alexa, Siri, Cortana) von 113 Studierenden genutzt. Obwohl diese Technologien bereits seit geraumer Zeit am Markt etabliert sind, scheint ihre Relevanz für den hochschulischen Alltag begrenzter zu sein. Diese eingeschränkte Relevanz könnte auf die geringeren Funktionalitäten im akademischen Kontext zurückzuführen sein. Es ist anzunehmen, dass die Nutzung dieser Sprachassistenten vorwiegend im privaten Umfeld erfolgt, da ihre Funktionalität in der Regel für das Studium begrenzt ist. Deutlich weniger verbreitet sind Smart-Home-Technologien wie smarte Beleuchtungssysteme oder Haushaltsroboter. Lediglich 52 Studierende gaben an, derartige Systeme zu nutzen. Diese geringere Verbreitung könnte mit den spezifischen infrastrukturellen Voraussetzungen sowie dem geringeren praktischen Nutzen im studentischen Alltag zusammenhängen. Im Bereich Gesundheit und Fitness nutzen 103 Studierende KI-gestützte Anwendungen wie Fitness-Tracker oder Gesundheitsapps. Dies verweist auf ein gewisses Maß an Gesundheitsbewusstsein sowie ein Interesse an datengestützter Selbstbeobachtung und Verhaltensoptimierung. Insgesamt zeigt sich, dass KI-Technologien mit unmittelbarem Alltagsbezug -insbesondere in den Bereichen Navigation, Kommunikation und Sprachverarbeitung - unter Studierenden besonders stark verbreitet sind. Dagegen werden Technologien, die mit physischen Geräten oder Investitionen verbunden sind, deutlich seltener genutzt. Die Ergebnisse verweisen auf unterschiedliche Zugangsmöglichkeiten, Nutzungsinteressen und Alltagsrelevanz von KI im studentischen Kontext.

Im Anschluss an die Frage zu den genutzten Technologien wurden die Studierenden danach befragt, für welche Zwecke sie KI aktuell nutzen. Ziel war es, ein Bild davon zu erhalten, in welchen Lebens- oder Arbeitsbereichen KI bereits praktisch Anwendung findet und wie oft diese genutzt wird. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die erfragten Nutzungsszenarien.

Tabelle 1: Nutzungsszenarien von KI im Studium
(1 = Nie bis 5 = Immer).

Kategorie (N=205)	M (SD)
Verständnisfragen und fachspezifische Konzepte erklären lassen	2.81 (1.106)
Texte lesen und verstehen	2.51 (1.215)
Texte schreiben	2.44 (1.068)
Literaturrecherche	2.26 (1.070)
Texte übersetzen	2.23 (1.206)
Prüfungen vorbereiten	1.84 (1.118)
Probleme lösen und Entscheidungen treffen	1.80 (1.017)
Bilder generieren	1.56 (.904)
Daten analysieren und Modelle entwickeln	1,50 (.855)
Konzepte und Projektdesigns entwickeln	1.47 (.783)
Daten visualisieren	1.45 (.788)
Präsentation erstellen	1.40 (.739)
Programme schreiben und Simulationen erstellen	1.16 (.480)

Angegeben sind die Mittelwerte (M) und Standardabweichungen (SD) für jedes Nutzungsszenario. Am häufigsten wurde die Nutzung von KI zur Klärung von Verständnisfragen und fachspezifischen Konzepten angegeben ($M = 2.81$, $SD = 1.106$). Auch das Lesen und Verstehen von Texten ($M = 2.51$, $SD = 1.215$) sowie das Schreiben von Texten ($M = 2.44$, $SD = 1.068$) gehören zu den häufiger genannten Einsatzbereichen. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass KI vor allem zur Unterstützung kognitiver Lernprozesse genutzt wird.

Moderate Mittelwerte zeigen sich bei der Literaturrecherche ($M = 2.26$) und beim Übersetzen von Texten ($M = 2.23$). Diese Nutzungsbereiche spiegeln eine gelegentliche, aber nicht regelmäßige Integration von KI in den Studienalltag wider.

Weniger häufig wird KI zur Vorbereitung auf Prüfungen ($M = 1.84$) oder zur Lösung von Problemen und zur Entscheidungsfindung ($M = 1.80$) eingesetzt. Noch seltener sind kreative oder technische Anwendungen wie das Generieren von Bildern ($M = 1.56$), das Entwickeln von Datenmodellen ($M = 1.50$) oder das Erstellen von Präsentationen ($M = 1.40$).

Die geringste Nutzung zeigt sich beim Schreiben von Programmen und der Erstellung von Simulationen ($M = 1.16$, $SD = 0.480$). Dies lässt darauf schließen, dass gerade diese technischen Verwendungen von KI im Studium der Sozialen Arbeit kaum eine Rolle spielen.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass KI von Studierenden primär für textbasierte und wissensvermittelnde

Zwecke genutzt wird. Komplexere, analytische oder gestalterische Einsatzbereiche bleiben hingegen weitgehend ungenutzt. Diese Nutzungsmuster könnten auf fehlende Kenntnisse oder Relevanz im Studienkontext hinweisen. Die nächste Frage lautete: „Woher stammt Ihr KI-Wissen?“. Die Ergebnisse in Abb. 2 zeigen, dass informelle Lernkontexte eine zentrale Rolle bei der Wissensaneignung spielen. Mit 157 Nennungen (75,5 %) wurde das soziale Umfeld am häufigsten als Wissensquelle angegeben. An zweiter Stelle folgt die eigenständige Recherche im Internet, die von 134 Studierenden (64,4 %) genannt wurde. Auch schulische Bildung wurde von 73 Befragten (35,1 %) als relevante Quelle genannt. Dagegen spielen formale Bildungswege wie Ausbildung (10 Nennungen; 4,8 %), vorheriges Studium (7 Nennungen; 3,4 %) sowie Onlinekurse und Bücher (jeweils 4 Nennungen; 1,9 %) nur eine untergeordnete Rolle. Berufliche Projekte wurden von 21 Teilnehmenden (10,1 %) als Wissensquelle identifiziert. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sich Studierende der Sozialen Arbeit primär in selbstorganisierten und alltagsnahen Kontexten mit KI auseinandersetzen.

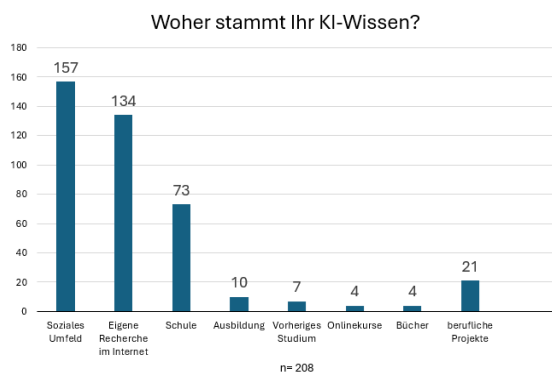


Abbildung 2: Wissensquellen in Bezug zu KI.

5 Diskussion

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass Künstliche Intelligenz (KI) im Studium der Sozialen Arbeit bislang eher zurückhaltend genutzt wird. Zwar bestehen zahlreiche Verwendungsmöglichkeiten – von der Literaturrecherche über das Verfassen und Verstehen fachlicher Texte bis hin zur Entwicklung von Projekten und der Analyse von Daten – jedoch greifen Studierende derzeit primär auf eher niedrigschwellige Funktionen zurück. Am häufigsten wird KI eingesetzt, um Texte zu lesen und besser zu verstehen, eigene Arbeiten zu verfassen und passende Literatur zu finden. Diese Nutzung ist pragmatisch motiviert und unterstützt klassische Studienanforderungen wie das Schreiben von Hausarbeiten oder das Vorbereiten auf Prüfungen. Weniger häufig werden dagegen komplexere Funktionen wie die Analyse empirischer Daten oder die Entwicklung von Konzepten und Projektdesigns verwendet.

Dieses Ergebnis steht jedoch in einem gewissen Spannungsverhältnis zu den allgemeinen Nutzungsmustern, die in Abb. 1 dargestellt sind. Dort zeigt sich, dass KI-basierte Technologien im Alltag der Befragten durchaus eine hohe Verbreitung finden. Insbesondere Chatbots wie ChatGPT, Sprachverarbeitungsdienste wie DeepL sowie Sprachassis-

tenten werden häufig genutzt – ebenso wie Navigations- und Transportanwendungen. Diese Daten deuten darauf hin, dass ein grundsätzliches Interesse sowie eine Vertrautheit im Umgang mit KI-Technologien durchaus vorhanden sind. Es stellt sich somit die Frage, weshalb der Einsatz im konkreten Studienkontext dennoch deutlich eingeschränkter ausfällt.

Ein möglicher Erklärungsansatz liegt im fehlenden Transfer zwischen Alltagserfahrungen mit KI und deren Verwendung im akademischen Umfeld. Während KI im Alltag oft intuitiv und als praktische Unterstützung wahrgenommen wird, erscheinen viele der studienbezogenen Verwendungsmöglichkeiten komplexer, theoretisch anspruchsvoller oder sind mit höheren Anforderungen an methodisch kontrollierte Nutzungskompetenzen und entsprechend vermitteltes und speziell dafür angeeignetes Fachwissen verbunden. So erfordert beispielsweise die Nutzung von KI zur Datenanalyse oder zur Konzeptentwicklung ein vertieftes Verständnis der Inhalte sowie ein sicheres Urteilsvermögen hinsichtlich der Validität und Aussagekraft der KI-generierten Ergebnisse. Diese Anforderungen können insbesondere im Studium der Sozialen Arbeit, das stark von sozioethischer Reflexion und professioneller Haltung geprägt ist, als Hemmnis für die Integration von KI wahrgenommen werden.

Darüber hinaus fehlt es bislang vielfach an einer systematischen curricularen und didaktischen Einbettung von KI ins Studium der Sozialen Arbeit. Studierende werden häufig mit Möglichkeiten und Grenzen KI-gestützter Werkzeuge allein gelassen. Dies führt aus Sicht der Autor:innen zu einer eher oberflächlichen oder rein pragmatischen Nutzung. In der Lehre mangelt es häufig an gezielt gestalteten Lernsettings, in denen der kritische und kontextangemessene Einsatz von KI vermittelt und erprobt werden kann. Gerade in einem Berufsfeld, welches sich durch zwischenmenschliche Beziehungsarbeit, ethische Entscheidungsprozesse und kontextsensibles Handeln auszeichnet, ist ein reflexiver und verantwortungsvoller Umgang mit KI von zentraler Bedeutung. Unsicherheiten über eine fachlich angemessene Nutzung solcher Technologien könnten also nicht nur technischer, sondern auch normativer Natur sein.

Zudem spielt die Frage nach professionellen Identitäten eine gewisse Rolle. In der Sozialen Arbeit besteht zudem möglicherweise eine grundlegende Skepsis gegenüber Technologien, die als potenziell entmenslichend oder distanzierend wahrgenommen werden – insbesondere, wenn sie in Bereichen eingesetzt werden, die traditionell als „beziehungsnah“ verstanden werden, wie Beratung, Fallverstehen oder Konzeptentwicklung. Diese Haltung – die in Teilen durchaus wichtig ist und zweifelsohne ihre Berechtigung hat – kann jedoch auch dazu führen, dass KI im Studium bewusst ausgeklammert oder lediglich in marginalen Funktionen genutzt wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Diskrepanz zwischen alltäglicher Nutzung KI-basierter Technologien und ihrer begrenzten Verwendung im Studium auf strukturelle, didaktische sowie professionsspezifische Ursachen zurückzuführen ist. Für die Lehre ergibt sich daraus ein klarer Handlungsbedarf: Studierende der Sozialen Arbeit sollten nicht nur in der wissenschaftlich, methodisch-kontrollierten Verwendung technischer Tools geschult,

sondern auch in ihrer Fähigkeit gestärkt werden, KI kritisch-reflexiv, kontextbewusst und ethisch verantwortungsvoll in ihren professionellen Handlungsfeldern zu nutzen. Dies erfordert eine curriculare Verankerung von digitalen respektive KI-Kompetenzen, die sowohl technische, analytische als auch ethische und reflexive Dimensionen umfasst. Nur so kann Künstliche Intelligenz im Studium der Sozialen Arbeit sinnvoll integriert und langfristig als zukunftsfähige, produktive Ressource im professionellen Handeln etabliert werden.

Die vorliegenden Ergebnisse liefern erste wichtige Hinweise auf das Nutzungsverhalten von Studierenden im Umgang mit KI-Technologien, insbesondere im Kontext der Sozialen Arbeit. Gleichzeitig eröffnen sie eine Vielzahl an Fragen, die im Rahmen weiterführender Forschung vertieft untersucht werden sollten. Zukünftige Studien könnten zunächst differenzierter analysieren, welche konkreten Hemmnisse der Integration von KI in das Studium entgegenstehen – etwa technologische Barrieren, fehlende didaktische Angebote, professionsethische Bedenken oder mangelnde Selbstwirksamkeitserwartungen seitens der Studierenden.

Darüber hinaus wäre es aufschlussreich, qualitative Erhebungen durchzuführen, die individuelle Deutungsmuster und Einstellungen gegenüber KI in der Sozialen Arbeit erfassen. Insbesondere die Frage, wie Studierende den Einsatz von KI mit professionellen Werten wie Beziehungsgestaltung, Autonomie, Partizipation oder Gerechtigkeit in Einklang bringen, bedarf einer vertieften Analyse. Ebenso könnten vergleichende Studien zwischen verschiedenen Hochschulstandorten, Studienphasen oder Fachrichtungen aufzeigen, inwieweit didaktische Gestaltung, fachkulturelle Prägungen oder institutionelle Rahmenbedingungen die Nutzung von KI beeinflussen. Auch eine stärker berufspraktisch differenzierte und vergleichende Analyse zu Gemeinsamkeiten und Unterschieden berufsbegleitend und dual Studierender gegenüber Direktstudierenden erscheint interessant, da aktuelle Studien diesem Aspekt bisher weniger Beachtung geschenkt haben und sich dies im Bereich der Sozialen Arbeit aufgrund der Studiengangsausrichtung hinsichtlich ihrer Zielgruppen geradezu anbietet.

Ein weiterer relevanter Aspekt betrifft die Langzeitwirkung von KI-Nutzung auf die Entwicklung professioneller Kompetenzen. Hier stellt sich beispielsweise die Frage, ob und inwiefern der Einsatz von KI die Reflexionsfähigkeit, Analysekompetenz oder ethische Urteilkraft fördert oder behindert. Schließlich sollte auch die Perspektive der Lehrenden systematisch einbezogen werden – etwa im Hinblick auf deren didaktische Strategien, Fortbildungsbedarfe und Einschätzungen zur Rolle von KI in der Hochschulbildung der Zukunft.

Nicht zuletzt erscheint es notwendig, auch die Weiterentwicklung spezifischer KI-gestützter Anwendungen für die Soziale Arbeit selbst zu untersuchen – etwa im Bereich der Entscheidungsunterstützung, Fallanalyse oder Dokumentation. In diesem Zusammenhang sollte eine interdisziplinäre Forschung angestrebt werden, die technologische Innovation mit sozialpädagogischer Fachlogik und ethischer Reflexion verbindet.

Literaturverzeichnis

- Baumhauer, M., Bulmann, U., & Watolla, A. K. (2024). KI-Tools in Studium und Lehre: Handreichung der TU Hamburg. <https://doi.org/10.15480/882.8694>.
- Dietrich, M. (2024). Künstliche Intelligenz in der Neurophysiologie. *Klinische Neurophysiologie*, 55, 256–258. <https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/abstract/10.1055/a-2346-5352>.
- Gabriel, S. & Römisch, B. (2024). Der Einsatz von KI-Tools im (wissenschaftlichen) Schreibprozess. Eine Schreibwerkstatt für Studierende. *R&E Source. More on Research. Konferenzband zum Tag der Forschung*, 11(3), 26–42. <https://doi.org/10.53349/re-source.2024.i3.a1289>.
- Johnson, M. & Senges, M. (2010). Learning to be a programmer in a complex organization. *Journal of Workplace Learning*, 22(3), 180–194. <https://doi.org/10.1108/13665621011028620>.
- Langer, J., Schmid, U. (2024). Generative KI. In: Furbach, U., Kitzelmann, E., Michaeli, T., Schmid, U. (eds) *Künstliche Intelligenz für Lehrkräfte*. ars digitalis. Springer Vieweg, Wiesbaden. 125-136. https://doi.org/10.1007/978-3-658-44248-4_10
- Lausberg, I., Tomic, J. & Feldermann, S. (2025). Studentisches Schreiben mit generativer KI: Inspiration oder intellektuelle Aneignung? *Zeitschrift für Hochschulentwicklung*, 20, 101–122. <https://doi.org/10.21240/zfhe/SH-KI-2/06>.
- Stützer, C. (2022). Künstliche Intelligenz in der Hochschullehre. Empirische Untersuchungen zu KI-Akzeptanz von Studierenden an (sächsischen) Hochschulen. Technische Universität Dresden. <https://doi.org/10.25368/2022.12>.
- Von Garrel, J., & Mayer, J. (2025). Künstliche Intelligenz im Studium- Eine quantitative Längsschnittstudie zur Nutzung KI-basierter Tools durch Studierende. 10 – 11. https://doi.org/10.48444/h_docs-pub-533.

3

**NextGen
diskutiert**

Between Promises and Hidden Complexities: The Sustainability Challenges of Artificial Intelligence

Inga-Maria Eichentopf, Laura Seelig

Contact: Inga-Maria Eichentopf, Hochschule Mittweida, inga-maria.eichentopf@hs-mittweida.de

Abstract

Artificial intelligence (AI) is increasingly promoted as a lever for the “green–digital” transition, yet its sustainability remains contested. This paper pursues a two-part analysis: AI for sustainability (uses of AI to achieve domain goals such as grid optimization or climate adaptation) and the sustainability of AI (the environmental and social implications of AI’s own life cycle). The paper argues that domain benefits do not, by themselves, establish sustainability. Drawing on the distinction between thin and thick sustainability, it demonstrates that narrow indicators or alignment on the sustainable development goals (SDGs) can obscure rebound effects, material throughput, and distributional asymmetries. The discussion addresses AI’s energy and environmental costs such as high compute training, water- and carbon-intensive data centers, hardware manufacture and disposal. It situates these within patterns of ecologically unequal exchange. Furthermore, three ‘materialities’ of AI are also explained in more detail: physical (critical minerals and energy), informational (data practices and infrastructures), and social (labor and governance), to show how benefits and burdens are unevenly distributed. The paper concludes that AI can be regarded as sustainable only when it both materially advances sustainability goals and meets robust life-cycle criteria. Where these conditions are not met, smaller models or non-use of AI should be considered.

Keywords: Sustainable AI, AI for Sustainability, Life-Cycle Assessment of AI, Thin and Thick Sustainability, Ecologically Unequal Exchange, Materiality of Artificial Intelligence, Rebound Effects in Digital Technologies.

1 Introduction

Artificial Intelligence (AI) is increasingly promoted as a pivotal point of the “twin green-and-digital transition” (Ben Youssef, 2025; Gao, 2024). Through innovations in resource optimization, disaster management, and climate action, AI has demonstrated significant potential for addressing environmental challenges. AI is often surrounded by an aura of sustainability, celebrated for improving energy efficiency and enhancing human capacity to tackle climate-related issues. Leading enterprises such as Alphabet (formerly known as Google), Microsoft, OpenAI, and Meta emphasize AI’s capacity to support progress towards sustainability.

Policymakers echo this optimism. For example, the European Green Deal expresses the expectation that AI can increase the effectiveness of policies for environmental protection as well as in dealing with climate change. (Cowls et al., 2023)

Yet the same technological systems that promote savings in CO₂ emissions, are themselves resource-intensive in ecological, economic, social and informational dimensions (Rehak, 2024). For instance, training a single large language model can emit tons of CO₂-equivalents, with the footprint varying by an order of magnitude depending on where electricity is sourced (Lacoste et al., 2019). Recent benchmark contests still reward marginal gains in model accuracy, not reductions in energy demand (Cowls et al., 2021). Such dynamics risk reproducing a modern Jevons Paradox: efficiency gains spur wider deployment, ultimately increasing total resource use. Moreover, the geographic asymmetry of clean-energy access means that benefits accrue disproportionately to the Global North, while environmental and social costs—from rare-earth mining to e-waste dumps—are externalized to the Global South (Crawford, 2021, pp. 31–32; Lacoste et al., 2019).

These tensions are amplified by enduring narratives about AI. Here, Kate Crawford (2021) identifies two persistent myths: First, that machine systems can replicate human intelligence. Second, that “intelligence” exists independently of the social and ecological relations in which it is produced. Such narratives risk obscuring the very real environmental and social externalities of AI—from energy-hungry data centre operations and critical-mineral extraction, to algorithmic bias and labour precarity.

Moreover, technological developments in AI usage for increased efficiency, e.g. in the energy sector, have contributed to the idea that AI used for sustainability is automatically sustainable (Van Wynsberghe, 2021).

On the policy level this is initially addressed in the EU AI Act, the first regulation to mitigate the risks arising from AI (European Parliament & Council of the European Union, 2024). It addresses sustainability of new AI systems and mandates the drafting of voluntary codes of conduct on “energy-efficient programming” and “the environmental sustainability of AI systems” (European Parliament & Council of the European Union, 2024, Art. 40). But this can only be a first step in taking systemic consequences of AI production and usage into account.

This discussion paper aims to address the hidden complexities of AI usage regarding sustainability.

The paper proceeds in three steps. Section 2 clarifies key concepts at the intersection of AI and sustainability, introducing the distinction between AI for sustainability and sustainable AI, and between thin and thick sustainability. Section 3 examines materialities and the unequal global exchange caused by the software and hardware of AI systems. Section 4 summarizes the aspects of the discussion and draws a conclusion.

2 Sustainability and AI

The concept of sustainability has evolved into a central guiding principle in contemporary policy and technological discourse. Originating in its modern form with the Brundtland Report (WCED, 1987, pp. 8, 43), sustainability was defined as development that “meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.” While rooted in earlier resource management traditions (e.g., von Carlowitz (Sächsische Carlowitz-Gesellschaft, 2013)), sustainability has since expanded to encompass the economic, environmental, and social dimensions of sustainability (Elkington, 1997). Since the 1990s, these principles have been institutionalized globally through initiatives such as the United Nations’ Agenda 21 and, more recently, the Sustainable Development Goals (SDGs) outlined in the Agenda 2030 (United Nations, 2015).

Rather than being a purely descriptive term, sustainability is a deeply normative concept, mobilized by different actors with diverging goals and underlying assumptions. (Frank, 2017; Happaerts & Bruyninckx, 2014) Every sustainability assessment therefore begins with defining “sustainability of what, why, and for whom?” (O’Connor, 2007, cited after Sala et al., 2015, p. 315) The hegemonial understanding of sustainability is also reflected in the SDGs and in much of corporate and policy discourse, builds on the so-called “three pillars” model: sustainability is here understood as the intersection of environmental protection, economic growth, and social equity (Elkington, 1997). However, this conceptualization, often visualized as a Venn diagram, suggests that these three domains can be reconciled or balanced through technical or managerial optimization (Purvis et al., 2019). Critics argue that such a representation obscures the conflicting and antagonistic nature of these three domains (Giddings et al., 2002). For instance, ecological sustainability and economic growth not only fail to align but even stand in direct contradiction to one another, particularly within capitalist growth logics (Georgescu-Roegen, 1971).

AI, meanwhile, has emerged as one of the most transformative technological developments of the 21st century (Mcafee & Brynjolfsson, 2017). Although often invoked in broad and sometimes ambiguous terms, AI generally refers to computational systems capable of performing tasks that typically require human intelligence, such as pattern recognition, decision-making, and language processing. Despite its powerful capabilities, current AI remains narrow in scope and highly dependent on data, computational resources, and contextual design.

To evaluate not only the economic, but moreover the environmental, social, or ethical aspects, a tool is needed to assess the sustainability of each specific AI model. A sustainability assessment as introduced by Heilinger et al. (2023) or a version of life cycle assessment (LCA) as proposed by Clemm et al. (2024) would be needed. Due to the contested nature of sustainability itself, it must be noted, that sustainability assessments of individual technologies, such as AI, are inherently conceptually and methodologically difficult (Sala et al., 2015).

The methodological challenges of sustainability assessment mirrors these conceptual ambiguities. Any attempt to quan-

tify and qualify the sustainability of a single technology necessarily involves boundary-drawing: which impacts are included or excluded, over which time horizons, and at which spatial scales? (Sala et al., 2015) Technologies such as AI cannot be meaningfully assessed in isolation. They are embedded in complex sociotechnical systems and broader political-economic structures that shape their development, deployment, and effects (Grunwald, 2009).

The impacts of AI—on labor markets, environmental degradation, and inequality—are highly context-dependent. Moreover, assessing trade-offs between different dimensions of sustainability raises profound ethical questions: How should social harm be weighed against environmental benefits, and who determines which sacrifices are acceptable, and for whom? As AI increasingly intersects with global sustainability agendas, a nuanced understanding is required to assess its dual role as both a potential enabler of sustainable development and a generator of significant ecological, economic, and social externalities. In economic terms, externalities refer to costs or benefits arising from an activity that affects third parties who are not directly involved in the transaction. Negative externalities, such as environmental pollution or resource depletion, represent uncompensated costs imposed on others (Pigou, 1924).

In this context, the two conceptual frameworks proposed by Van Wynsberghe (2021) and Heilinger et al. (2024) on the relationship between AI and sustainability provide an orientation for analyzing these tensions. Building on Van Wynsberghe, Sustainable AI comprises two analytically distinct yet interdependent strands: AI for sustainability and the sustainability of AI. AI for sustainability denotes the instrumental deployment of AI or machine learning (ML) to advance sustainability objectives—most explicitly, to contribute to the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) (e.g., expanding access to affordable and clean energy).

By contrast, the sustainability of AI interrogates AI as a socio-technical system across its lifecycle (design, training, re-tuning, deployment, governance). Here, the focus is on energy and carbon footprints, data-centre and hardware infrastructures, and questions of distributive and inter-/intragenerational justice. Van Wynsberghe emphasises that applications “for sustainability” cannot be pursued in isolation from these upstream and downstream impacts; the two branches must be addressed jointly.

Heilinger et al. (2024) build on Van Wynsberghe’s distinction between “AI for sustainability” and “sustainability of AI”. The authors criticize premature verdicts about AI technologies as sustainable and have thus introduced the distinction between “thin” and “thick” conceptions of sustainable AI. Thin approaches rely on surface-level compatibility with SDGs, often emphasizing efficiency gains or marginal emissions reductions in single sustainability dimensions. Thick approaches, by contrast, call for a deeper normative engagement with the social and ecological preconditions of sustainability, including considerations of justice, equity, and systemic change. Heilinger et al. (2024) argue that a meaningful sustainability assessment must consider the complete material picture of AI technologies’ production, from resource extraction to disposal, to determine whether they are environmentally and socially sustainable.

Furthermore, the discourse around sustainable AI is frequently shaped by techno-solutionist rhetoric (Schütze, 2024). This narrative posits that technological innovation, including AI, can resolve social and environmental problems without altering underlying economic or political structures (Brevini, 2023). Yet such framings risk depoliticizing sustainability and distracting from the need for systemic transformation. As Peter Schadt (2025, p. 9) has noted, the alleged possibility of balancing the risks and opportunities in AI often ignores the asymmetries of cost and benefit: the profit of some is made possible by the environmental degradation and precarious labor conditions endured by others.

3 Physical and Non-Physical Aspects of Artificial Intelligence

3.1 The Materialities of Artificial Intelligence

While AI technologies are often discussed in both public and academic discourse as a dematerialized or “weightless” technology, its sustainability must be evaluated in light of the very real material, energetic, and labor-intensive infrastructures that underpin its development and use. The narrative illusion of dematerialization obscures the ecological and social costs associated with AI, reinforcing the need to re-materialize our understanding of digital technologies. These costs manifest not only in literal environmental material terms but also through informational and social materialities (Rehak, 2024), all of which are embedded in global systems of economic and ecological inequality (see next section).

Ecologically, AI systems depend on the extraction, consumption, and disposal of vast quantities of finite natural resources, such as cobalt, lithium, and rare earths, as well as high volumes of water and energy, much of which is sourced from fossil-fuel-based systems. These processes are particularly destructive in the Global South, where resource extraction frequently entails significant ecological degradation and human rights violations. The computational infrastructure that enables contemporary machine learning—ranging from network equipment and batteries to servers and user devices—depends on minerals and elements formed over geological timescales. Contemporary supply chains compress this “deep time” into artefacts engineered for comparatively short service lives, creating high rates of replacement that stimulate continued extraction, materials processing, global logistics, and ultimately contributions to transboundary e-waste flows. Across these stages, value and power are concentrated within extended, multi-tier supply networks that mobilise unevenly compensated labour and substantial embodied energy, thereby coupling AI development to intensified resource throughput (Crawford, 2021, p. 31).

Research and innovation dynamics further reinforce these material pressures. Prevailing objectives in AI research and deployment continue to prioritize incremental gains in predictive performance over reductions in energy intensity, a configuration that increases the aggregate environmental burden of AI systems (Cowls et al., 2023). Moreover, efficiency improvements can induce rebound effects analogous to the Jevons paradox: lower energy cost per

task encourages wider adoption and greater total computation, raising overall resource consumption. Recognition of this tension between rapid AI capability expansion and environmental commitments has also emerged in industry discourse (Nadella, 2025). Taken together, these patterns indicate that AI’s energy consumption is not a peripheral by-product but a constitutive feature of a broader socio-ecological metabolism linking planetary extraction to short-lived computational outputs.

Beyond the physical, AI also entails an informational materiality. Both discriminative and generative AI systems rely on probabilistic models built from large-scale, continuously updated data sets. These systems do not deliver precise or deterministic results but rather produce heuristic outputs appropriate for narrow and specific tasks. Consequently, AI is not a “general purpose technology” in any meaningful sense. The requirement for vast and up-to-date data reinforces tendencies toward data centralization, raising questions about the long-term utility, scalability, and social costs of such infrastructures.

Couldry and Mejias (2019) coined the concept of Data Colonialism. The defining feature of industrial capitalism is its ability to transform human activity and life processes into “things” with value (Postone, 1998), of which data is but another form that is appropriated through what the authors (2019, 343) call data relations: “new types of social relations implicate human beings in processes of data extraction, but in ways that do not *prima facie* seem extractive”. This appropriation of ‘all of life’ for profit resembles colonialist extractive practices that are paired with the “abstract quantification power of computing” (337) which is expanding with the rate as ever more people are incorporated into digital infrastructures. The authors call for resistance against data colonialism by attacking its foundational logic—the normalization of appropriation—rather than just its surface manifestations.

Perhaps the most obscured dimension of artificial intelligence is its social materiality, the global labor infrastructures that underpin its technical performance. At the core of AI technologies lies software: the algorithmic transformation of structured instructions into probabilistic procedures for automated problem-solving. This process relies on vast amounts of input data which must be meticulously annotated to be usable for machine learning. For instance, an AI system trained to detect and classify road signs for autonomous vehicles must process a wide array of sign types, shapes, and colors, as well as contextual variations across countries and regions. These include subtle distinctions in design conventions, occlusions by vegetation, wear-and-tear effects, weather-induced distortions, and diverse lighting conditions. Annotators must label not only the presence of a sign but also its category and, in some cases, its legibility within the broader visual field. Such detailed annotation is indispensable for systems expected to operate reliably in dynamic, real-world environments.

This labor is performed by a big and largely invisible global workforce. Often referred to as ‘ghost workers’ in the sociology of labor, these individuals carry out repetitive tasks such as data annotation, classification, and curation under precarious conditions (Gray & Suri, 2019). Major technology companies systematically out-source this labor to low-wage economies through opaque subcon-

tracting chains, exploiting global disparities in labor rights and protections. Enabled by the asymmetrical power of corporate platforms over their supply chains, this arrangement allows firms to preserve the illusion of seamless, autonomous technological advancement. Despite their absence in dominant AI narratives, ghost workers are essential to the functioning of contemporary machine learning systems.

While estimates of the global workforce engaged in data-related tasks vary, it is clear that this labor continues to grow even as public discourse increasingly frames AI as a path toward labor-saving automation. The expanding data annotation sector further underscores AI's structural dependence on low-paid human labor (Munn, 2024). Yet the widely circulated promise of AI as a generator of universal productivity gains continues to obscure the deep asymmetries of power, labor, and value extraction that define its global supply chains upon which its purported benefits ultimately rest.

These dynamics align with and are perpetuated by broader structures facilitated through mechanisms of unequal exchange in international trade. As theorized in International Political Economy, the economic growth and technological innovation of high-income countries rely disproportionately on the appropriation of labor, resources, and value from lower-income regions. This appropriation is structurally embedded in international trade relations, where core states and transnational firms leverage geopolitical and commercial power to depress wages, prices, and profits in the Global South (Raffer, 1987). These price distortions force Southern producers to export greater quantities of labor and resources embodied in traded goods to maintain trade balances, effectively enabling a net transfer of value to the North. Structural adjustment programs in the 1980s and 1990s further entrenched these dynamics by devaluing Southern currencies, dismantling labor and environmental protections, and re-orienting economies toward low-value, export-led growth (Babb, 2005). As a result, Southern countries have become locked into subordinate roles within global commodity chains—where over 70% of trade now takes place—while firms headquartered in the North consolidate profit through supply chain dominance. Consequently, the Global North consumes more labor than it contributes to the global economy: while workers in the South perform roughly 90% of all labor across sectors, they receive only 21% of global income. If this labor were remunerated according to prevailing Northern wage standards, it would have amounted to €16.9 trillion in 2021 (Hickel et al., 2024). This systemic asymmetry not only facilitates capital accumulation and consumption in the North but simultaneously constrains the Global South's capacity for equitable development and environmental sustainability.

3.2 Global Inequality and Ecologically Unequal Exchange Driven by AI

The concept of *Ecologically Unequal Exchange* (EUE) builds on these insights and emerged at the intersection of political ecology and world-systems analysis, drawing on interdisciplinary efforts to understand the asymmetric flows of energy, materials, and land that underpin the

global economy. Scholars of EUE build on world-systems theory to demonstrate how core countries systematically benefit from biophysical resources extracted from the periphery (Dorninger et al., 2021). Central to this approach is the idea that market prices obscure the real, biophysical costs of production, which include not only labor but also energy dissipation and environmental degradation, as noted by Georgescu-Roegen's (1971) entropy-based critique of economic value. EUE has since inspired a range of quantitative methodologies, highlighting how high-income nations disproportionately appropriate environmental space and offload entropy onto lower-income regions. Empirical studies consistently confirm these asymmetries in global trade patterns, both historically (e.g., Britain's 19th-century textile trade) and in recent decades (e.g., net resource imports by the U.S., Europe, and Japan) (Hornborg, 2024). It renders the sustainability claims of AI companies highly problematic, especially when viewed through the lens of inter- and intragenerational justice. Any credible sustainability assessment of AI must therefore move beyond narrow technological parameters to confront the deeply entrenched global inequalities on which the contemporary AI economy depends.

4 Conclusion

This paper argued that sustainable AI cannot be reached just by improving the efficiency of machines and declaring intentions.

The distinction between AI for sustainability and the sustainability of AI illustrates why gains in different fields do not automatically offset upstream and downstream costs. A thin approach risks masking of rebound effects, externalized harms, and distributional asymmetries, whereas a thick conception requires remaining within ecological limits and advancing inter- and intragenerational justice.

In general, contemporary AI relies on high-compute training and rapid iteration, on global supply chains of critical materials and water-intensive data centers, and on large volumes of data work dynamics that connect AI to intensified resource throughput. These processes interact with patterns of ecologically unequal exchange, whereby environmental burdens are disproportionately carried by the global south while value concentrates in the northern countries. Although efficiency gains are desirable, they can increase the overall demand for computing power and infrastructure, so assessments that confine themselves to carbon accounting or narrow benchmark gains are insufficient. Measures often proposed in response to this analysis, such as establishing voluntary commitments to energy-efficient programs, remain inadequate to address the systemic problems outlined above.

The authors propose three priorities aligned with the article's findings: (i) life-cycle transparency with time- and location-matched energy disclosure and reporting of embedded carbon and water use; (ii) tests on proportionality linking compute, data, and materials to demonstrated public value; and (iii) governance of scale, including compute and energy budgets, siting rules for data centers, and reuse/repair mandates for hardware. Finally, non-use or the adoption of smaller, simpler models should be recognized as legitimate outcomes whenever environmental and

social costs exceed prospective benefits.

Assessed through the lens of thick sustainability, AI's potential to foster genuine, long-term sustainability appears limited, reinforcing the need for critical scrutiny and systemic reform rather than blind technological optimism.

References

- Babb, S. (2005). The Social Consequences of Structural Adjustment: Recent Evidence and Current Debates. *Annual Review of Sociology*, 31, 199–222. <https://doi.org/10.1146/annurev.soc.31.041304.122258>
- Ben Youssef, A. (2025). Twin Transition: Digital Transformation Pathways for Sustainable Innovation. *Sustainability*, 17(21), 9491. <https://doi.org/10.3390/su17219491>
- Brevini, B. (2023). Artificial Intelligence, Artificial Solutions: Placing the Climate Emergency at the Center of AI Developments. In H. S. Sætra (Hrsg.), *Technology and Sustainable Development: The Promise and Pitfalls of Techno-Solutionism* (S. 25–33). Routledge.
- C. Clemm, L. Stobbe, K. Wimalawarne and J. Druschke, "Towards Green AI: Current Status and Future Research," 2024 Electronics Goes Green 2024+ (EGG), Berlin, Germany, 2024, pp. 1-11, doi: 10.23919/EGG62010.2024.10631247.
- Couldry, N., & Mejias, U. A. (2019). Data Colonialism: Rethinking Big Data's Relation to the Contemporary Subject. *Television & New Media*, 20(4), 336–349. <https://doi.org/10.1177/1527476418796632>
- Cowls, J., Tsamados, A., Taddeo, M., & Floridi, L. (2023). The AI gambit: Leveraging artificial intelligence to combat climate change—Opportunities, challenges, and recommendations. *AI & SOCIETY*, 38(1), 283–307. <https://doi.org/10.1007/s00146-021-01294-x>
- Crawford, K. (2021). *Atlas of AI - Power, Politics, and the Planetary Costs of Artificial Intelligence*. Yale University Press.
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. Capstone.
- European Parliament & Council of the European Union. (2024, June 13). Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act) [Regulation]. *Official Journal of the European Union*, L 279, 1–109. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj>; Date: 3.11.2025
- Frank, A. K. (2017). What is the story with sustainability? A narrative analysis of diverse and contested understandings. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 7(2), 310–323. <https://doi.org/10.1007/s13412-016-0388-3>
- Gao, X. (2024). The EU's twin transitions towards sustainability and digital leadership: a coherent or fragmented policy field? *Regional Studies*, 59(1). <https://doi.org/10.1080/00343404.2024.2360053>
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press.
- Giddings, B., Hopwood, B., & O'Brien, G. (2002). Environment, economy and society: Fitting them together into sustainable development. *Sustainable Development*, 10(4), 187–196. <https://doi.org/10.1002/sd.199>
- Gray, M. L., & Suri, S. (2019). *Ghost Work: How to Stop Silicon Valley from Building a New Global Underclass*. Houghton Mifflin Harcourt.
- Grunwald, A. (2009). Technology Assessment: Concepts and Methods. In A. Meijers (Hrsg.), *Philosophy of Technology and Engineering Sciences* (S. 1103–1146). North-Holland.
- Happaerts, S., & Bruyninckx, H. (2014). Sustainable development: The institutionalization of a contested policy concept. In M. M. Betsill, K. Hochstetler, & D. Stevis (Eds.), *Advances in International Environmental Politics* (pp. 300–327). Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1057/9781137338976_12
- Heilinger, J.-C., Kempt, H., & Nagel, S. (2024). Beware of sustainable AI! Uses and abuses of a worthy goal. *AI and Ethics*, 4(2), 201–212. <https://doi.org/10.1007/s43681-023-00259-8>
- Hickel, J., Hanbury Lemos, M., & Barbour, F. (2024). Unequal exchange of labour in the world economy. *Nature Communications*, 15(1), 6298. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49687-y>
- Hornborg, A. (2024). Beyond the Veil of Market Prices—The Implications of Ecologically Unequal Exchange for Conceptualizations of Technological Development: A Critical Survey. *Contributions to Political Economy*, bzae016. <https://doi.org/10.1093/cpe/bzae016>
- Lacoste, A., Luccioni, A., Schmidt, V., & Dandres, T. (2019). Quantifying the Carbon Emissions of Machine Learning (No. arXiv:1910.09700). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.09700>
- Mcafee, A., & Brynjolfsson, E. (2017). *Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future*. Norton.
- Munn, L. (2024). Digital Labor, Platforms, and AI. In: Werthner, H., Ghezzi, C., Kramer, J., Nida-Rümelin, J., Nuseibeh, B., Prem, E., Stanger, A. *Introduction to Digital Humanism*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45304-5_35
- Nadella, S. [@satyanadella]. (2025, Januar 27). Jevons paradox strikes again! As AI gets more efficient and accessible, we will see its use skyrocket, turning it into a commodity we just can't get enough of. X. <https://x.com/satyanadella/status/1883753899255046301?mx=2>

- O'Connor, M. (2007). Paradigm for sustainability assessment: Inventory of costs and benefits versus representative diversity of indicators. (Background Paper in Support of the United Nations System of Environmental-Economic Accounts (SEEA) 2010 Reform Process).
- Pigou, A. C. (1924). *The economics of welfare*. London: Macmillan.
- Postone, M. (1998). Rethinking Marx (in a Post-Marxist World). In C. Camic (Hrsg.), *Reclaiming the Sociological Classics*. Wiley-Blackwell.
- Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: In search of conceptual origins. *Sustainability Science*, 14(3), 681–695. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5>
- Raffer, K. (1987). *Unequal Exchange and the Evolution of the World System*. Palgrave Macmillan London.
- Sala, S., Ciuffo, B., & Nijkamp, P. (2015). A systemic framework for sustainability assessment. *Ecological Economics*, 119, 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.015>
- Sächsische Carlowitz-Gesellschaft (e.V.). (2013). *Die Erfindung der Nachhaltigkeit: Leben, Werk und Wirkung des Hans Carl von Carlowitz*. oekom verlag.
- Schadt, P. (with Schaller, L.). (2025). *Zwischen Terminator und Taschenrechner – Künstliche Intelligenz im Zeitalter ihrer ökonomischen Nutzbarkeit*. Maro.
- Schütze, P. (2024). The impacts of AI futurism: an unfiltered look at AI's true effects on the climate crisis. *Ethics and Information Technology*, 26, Article 23. <https://doi.org/10.1007/s10676-024-09758-6>
- United Nations (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for sustainable development*. Resolution A/Res/70/1. Retrieved from: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>
- World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press.