

Damit rechnet niemand!

Sechs Leitgedanken zu Implikationen und Forschungsbedarfen zu KI-Technologien im Mathematikunterricht

Nils Buchholtz, Sebastian Schorcht, Lukas Baumanns, Judith Huget, Norbert Noster, Benjamin Rott, Hans-Stefan Siller und Daniel Sommerhoff

Aktuelle Diskussionen zum Thema Künstliche Intelligenz (KI) sind auch für das schulische Lehren und Lernen von Bedeutung, und somit auch aus dem Mathematikunterricht bzw. dem Lehren und Lernen von Mathematik nicht mehr wegzudenken. Die mathematikdidaktische Forschungscommunity ist bereits aktiv geworden, wie beispielsweise das Diskussionsforum auf der GDM-Tagung im März 2024 (Sommerhoff et al. 2024) zeigte. Im Juni fand zudem an der Universität Würzburg ein KI-Vernetzungstreffen mit Teilen der wissenschaftlichen Community statt.¹ Während auf der GDM-Tagung vor allem ein Austausch von Erfahrungen und Forschungsansätzen mit dem Thema im Zentrum stand und das Vernetzungstreffen Expertinnen und Experten auch aus benachbarten Disziplinen in die Diskussion integrierte, soll es nun darum gehen, Implikationen und Forschungsbedarfe zu identifizieren, um gezielte Weiterentwicklungen in der mathematikdidaktischen Forschung anzuregen.

Die Vielfalt an KI-Technologien und deren Potenzial für spezialisierte Anwendungen im Bildungsbereich haben uns dazu bewogen, in einem gemeinsamen Ansatz die Relevanz Künstlicher Intelligenz für das Lehren und Lernen speziell von Mathematik und die Mathematikdidaktik näher zu beleuchten und einzuordnen. Unser Ansatz besteht darin, verschiedene Perspektiven zusammenzuführen, um das Feld zu strukturieren sowie einen möglichst breiten Konsens über Implikationen und aktuelle Forschungsbedarfe zu bilden. Dabei ist vorweg zu betonen, dass das Thema KI sehr vielfältig ist und begrifflich verschiedene Facetten aufweist. Wir klären daher zunächst im nächsten Abschnitt die Begrifflichkeiten und widmen uns anschließend der Bedeutung sowie den Herausforderungen von KI-Technologien für das schulische Lehren und Lernen von Mathematik. Gängigen Angebot-Nutzungs-Modellen (z. B. Helmke, 2009) folgend, erscheinen uns strukturell dabei vor allem zwei unterschiedliche Perspektiven relevant. Diese umfassen einerseits die Nutzung von Künstlicher Intelligenz im Rahmen der Lernprozesse der Schülerinnen und Schüler und andererseits der

Einsatz von KI zum Schaffen des Lernangebots, d. h. dem Unterrichten von Mathematik durch die Lehrkräfte. Wir formulieren sechs Leitgedanken, die sich auf aktuelle Einsatzmöglichkeiten von KI-Technologien im Kontext des Lehrens und Lernens beziehen und diskutieren jeweils Chancen und potenzielle Risiken, sowie Perspektiven und Forschungsbedarfe, die sich für die mathematikdidaktische Forschung ergeben. Dieser Zusammentrag kann bei der Fülle an wissenschaftlichen und nicht-wissenschaftlichen Publikationen, die sich in den letzten Monaten in Bezug zu diesem Thema ergeben hat, keinen Anspruch auf Vollständigkeit (etwa im Sinne eines Literaturreviews) stellen. Er soll vielmehr die Forschungsgemeinschaft zur Diskussion einladen.

Was sind KI-Technologien? – Künstliche Intelligenz im Allgemeinen

Der Einsatz von Künstlicher Intelligenz im Bildungsbereich umfasst ein breites Spektrum an verschiedenen Technologien und Anwendungsfällen, so dass der Begriff „KI“ definitiv nicht eindeutig ist (vgl. Abbildung 1). Dies hat zur Folge, dass es in der Diskussion um die Bedeutung dieser Technologie nicht „eine“ oder „die“ KI gibt, sondern viele spezialisierte Verwendungen und Technologien, die den Unterricht in der einen oder anderen Weise beeinflussen können, die eine Beschreibung auf allgemeiner Ebene aber erschweren. Wir orientieren uns pragmatisch im Folgenden am Begriff „KI-Technologien“ zur Beschreibung dieser Vielfalt von technologischen Anwendungen und grenzen davon sprachlich den Spezialfall „generativer KI“ als aktuell unterrichtlich hoch relevante Art der KI-Technologie ab.

Grundlage der begrifflichen Auseinandersetzung ist das Forschungsfeld zur Künstlichen Intelligenz, das sich mit der Entwicklung und Erforschung von Systemen befasst, die intelligentes menschliches Verhalten simulieren. Dabei umfassen diese Systeme eine Vielzahl von Techniken und Modellen, die für unter-

¹ www.mathematik.uni-wuerzburg.de/didaktik/aktuelles/single/news/ki-symposium-im-bereich-der-didaktik-der-mathematik/

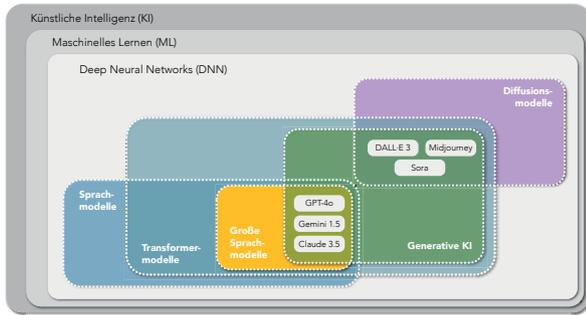


Abbildung 1. Einordnung aktueller, generativer KI (angelehnt an Svendsen, 2023)

schiedliche Aufgaben eingesetzt werden, von der Bilderkennung bis hin zur Sprachverarbeitung. Digitale Anwendungen wie die automatisierte Rechtschreibprüfung oder Schreibassistenten und Übersetzungsprogramme wie DeepL nutzen beispielsweise KI, um Texte auf Fehler zu überprüfen, zu übersetzen und Korrekturvorschläge zu machen.

Eine Schlüsseltechnologie innerhalb der KI ist das Maschinelle Lernen (ML). ML-Algorithmen ermöglichen es Computern, aus bestehenden Daten Entscheidungen zu lernen und bisher nicht bewertete Daten zu klassifizieren. So können z. B. Muster in großen Datensätzen erkannt und auf dieser Basis Vorhersagen oder Empfehlungen getroffen werden. Im Bildungsbereich können ML-basierte Empfehlungssysteme personalisierte Lerninhalte vorschlagen, die auf den Interessen und Fortschritten der Lernenden basieren. Auch die frühzeitige Identifikation von Bedarfen, auf die adaptiv reagiert werden kann, ist ein Anwendungsbeispiel. So werden ML-Algorithmen beispielsweise in bestimmten Formen von Learning Analytics genutzt, auch um individuelle Lernpfade von Schülerinnen und Schülern zu bestimmen (vgl. Hershkovitz et al., 2024) und das Lernen personalisierter zu gestalten. Learning Analytics nutzt dynamische Informationen über Lernende und Lernumgebungen, indem sie diese bewertet, erhebt und analysiert, um Lernprozesse, Lernumgebungen und pädagogische Entscheidungen in Echtzeit zu modellieren, vorherzusagen und zu optimieren (Ifenthaler, 2015).

Eine spezialisierte Unterkategorie des Maschinellen Lernens sind Deep Neural Networks (DNN). Diese mehrschichtigen Netzwerke aus Knoten (in Anlehnung an das menschliche Gehirn Neuronen genannt) sind in der Lage, komplexe Muster in umfangreichen Datensätzen zu erkennen. DNNs bilden die Grundlage für viele moderne KI-Anwendungen, darunter Sprach- und Bilderkennungssysteme. Ein Spezialgebiet sind Sprachmodelle, die speziell für die Verarbeitung und

Erzeugung menschlicher Sprache entwickelt wurden. Sie können Texte (zu einem gewissen Grad) verstehen, generieren und übersetzen. Besonders hervorzuheben sind hier die Transformer-Modelle, die auf einer Architektur basieren, die es ermöglicht, lange Abhängigkeiten in Texten zu verarbeiten und kontextuell relevante Antworten zu erzeugen (Generative Pretrained Transformer, GPT). Zu den fortschrittlichsten Sprachmodellen zählen derzeit die großen Sprachmodelle (Large Language Models, LLMs) wie GPT-4 bzw. GPT-4o, Gemini 1.5 oder Claude 3.5, auf denen u. a. auch ChatGPT basiert. Diese Modelle sind anhand riesiger Datensätze darauf trainiert, menschenähnlichen Text zu generieren und vielfältige Aufgaben wie Textzusammenfassungen, Übersetzungen und Dialogführung zu übernehmen. Ihre besondere Stärke liegt in der Fähigkeit, große Mengen an Textdaten zu verarbeiten und auf dieser Basis kohärente und sinnvolle Antworten zu liefern. Ein weiteres spezialisiertes KI-Modell sind Diffusionsmodelle, die zur Generierung von visuellen und audiovisuellen Inhalten verwendet werden (Schorcht et al., 2024). Bekannte Beispiele sind DALL-E 3, Midjourney oder Sora. Diese Modelle können aus einfachen Textbeschreibungen komplexe Bilder und Videos erstellen und finden Anwendung in kreativen und medialen Bereichen. Multimodale Künstliche Intelligenz kombiniert diese verschiedenen Datentypen wie Text, Bild, Audio und Video. Dazu werden oft mehrere KI-Modelle zur Verarbeitung unterschiedlicher Daten genutzt und zur Generierung eines kohärenten Outputs miteinander verknüpft, wie dies beispielsweise ChatGPT-4o leistet.

Sechs Leitgedanken zu Implikationen und Forschungsbedarfen zu KI-Technologien im Mathematikunterricht

Im Folgenden wollen wir unter sechs Leitgedanken die Einsatzmöglichkeiten von KI-Technologien im schulischen Lehren und Lernen von Mathematik und in der Lehrerbildung entfalten und diese Anwendungen kurz anhand von Chancen und potenziellen Risiken diskutieren.

Nutzen von KI-Technologien aus der Perspektive von Schülerinnen und Schülern

Leitgedanke 1: KI-Technologien ermöglichen Lernenden spezifische Zugänge zu mathematischen Inhalten.

Damit KI-Technologien für mathematische Lernprozesse von Schülerinnen und Schülern nutzbar gemacht werden können, sollten KI-unterstützte Lernangebote domänen- bzw. inhaltspezifisch entwickelt werden.

Hierbei ergibt sich unter anderem eine interessante Forschungsperspektive insbesondere auch für die stoffdidaktische Forschung zur Strukturierung und Anordnung von mathematischen Lerninhalten unter Berücksichtigung von Aspekten des Zugänglichmachens ohne zu verfälschen (Kirsch, 1977). Unter derartige Anwendungsbereiche von KI fällt etwa die funktionale Nutzung von multimodalen generativen KI-Tools (wie Gemini 1.5 oder GPT-4o) in digitalen Lernumgebungen, die Sprachen erkennen und übersetzen können oder Texte, Bilder, Graphen, symbolische Terme, Gleichungen oder Tabellen und Diagramme generieren können (siehe zur Erstellung von Vektorgrafiken auch Helfrich-Schkarbanenko, 2023). Sie lassen sich perspektivisch zum einen zur Erstellung verschiedener Darstellungen mathematischer Inhalte im Unterricht nutzen (Maddigan & Susnjak, 2023) und ermöglichen den aktiven Wechsel von Repräsentationen, welcher mathematische Lernprozesse unterstützen kann (Katter & Huget, 2024). Zum anderen ermöglicht der vereinfachte sprachliche Zugang durch KI-Tools wie z. B. durch den (momentan noch angekündigten) GPT-4o voice mode, dass Schülerinnen und Schüler mit der generativen KI in natürlicher Sprache nahezu ohne Unterbrechung kommunizieren können. Damit kommt neben den verschiedenen generierbaren Repräsentationsformen vor allem der sprachlichen Einbettung von mathematischen Lerninhalten absehbar im Unterricht, aber auch außerhalb des Unterrichts eine noch bedeutendere Rolle zu. Die generative KI könnte hier als entsprechender „Resonanzraum“ zur Etablierung neuer Formen der Kommunikation über Mathematik und zum Abbau von Barrieren und damit zur Erstellung von inklusiven Lernangeboten genutzt werden.

KI-Technologien bieten zudem die Möglichkeit der automatisierten Erstellung didaktisch aufbereiteter Musterlösungen (worked-out-examples) mathematischer Aufgaben sowie passgenauer Lernhilfen und Scaffolding-Maßnahmen (Jia et al., 2024; Pardos & Bahndari, 2024; Pham Van Long et al., 2023). Diese können Schülerinnen und Schüler beim selbstständigen Bearbeiten von Mathematikaufgaben als Orientierung und Unterstützung dienen und somit den Lernprozess fördern. Eine Untersuchung von Gilles (2024) befasste sich beispielsweise mit der Fähigkeit von ChatGPT, Lösungswege für Routineaufgaben im Bereich quadratischer Gleichungen zu generieren. Hierfür wurden 60 von ChatGPT erstellte Aufgabenbearbeitungen analysiert, die unter Verwendung verschiedener Prompt-Techniken erstellt wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass ChatGPT in der Lage war, die Lösung der Aufgabe zufriedenstellend in eine Abfolge von Lösungsschritten zu gliedern und dabei gestufte Hinweise zu geben. Dies deutet darauf hin, dass generative

KI das Potenzial hat, Schülerinnen und Schüler beim eigenständigen Bearbeiten von Mathematikaufgaben durch die Bereitstellung strukturierter Lösungswege zu unterstützen. Es ließ sich im Versuch zusätzlich auch erreichen, dass eine vollständige Lösung der Aufgabe nicht vorweggenommen wird und durch die Lernenden selbst geleistet werden muss (Gilles, 2024). Auch die Fehlerrate bei der Erstellung mathematischer Lernhilfen kann durch die Anwendung spezifischer Prompt-Techniken weiter reduziert werden (Pardos & Bahndari, 2024).

Derartige auf der Erstellung von strukturierten Lernhilfen beruhenden Anwendungen von KI-Technologien erscheinen insbesondere für einen Unterricht geeignet, der stark auf dem selbstregulierten Lernen der Schülerinnen und Schüler basiert. Dies erfordert daher – ähnlich wie schon in der Diskussion um Smartphone-Apps wie z. B. Photomath – das Entwickeln und Beforschen adäquater Lernumgebungen und Aufgabenstellungen (Klinger, 2019). Hier ist beispielsweise auch an die methodische und technisch-unterstützte Weiterentwicklung von traditionellen Unterrichtsbestandteilen wie Übungsphasen zu denken. Die Nutzung von KI-Technologien zur Erstellung adaptiver, auf die individuellen Vorkenntnisse der Lernenden abgestimmter Lernhilfen erfordert zusätzlich seitens der Lehrkraft hinreichende diagnostische Kompetenzen. Nur wenn die Lehrkraft in der Lage ist, die Lernvoraussetzungen der Schülerinnen und Schüler zutreffend einzuschätzen und diagnostische Entscheidungen, die beispielsweise durch Learning Analytics bereitgestellt werden, zu validieren und zu nutzen, kann sie ein KI-unterstütztes Lernangebot zielgerichtet an die Bedürfnisse der Lernenden anpassen. Dies setzt voraus, dass Lehrkräfte über fundiertes Wissen bezüglich der Erhebung und Interpretation diagnostischer Informationen verfügen und dieses Wissen effektiv mit den Möglichkeiten der KI verknüpfen können.

Leitgedanke 2: KI-Technologien können eine Akzentuierung der Schwerpunktsetzungen in der Entwicklung prozessbezogener Kompetenzen bewirken.

Die Unterstützung von mathematikspezifischen Denk- und Arbeitsweisen wie etwa des Problemlösens, Modellierens oder Beweisens durch KI-Technologien (Helfrich-Schkarbanenko, 2023; SWK, 2024) könnte langfristig zu einer Weiterentwicklung und Neubewertung von prozessbezogenen mathematischen Tätigkeiten im Unterricht führen. Beispiele für derartige Veränderungen aus den professionellen Tätigkeiten von Mathematikerinnen und Mathematikern umfassen etwa schon jetzt das technologisch unterstützte Arbeiten

mit Beweisgenerierungs- und -überprüfungssystemen wie LEAN (Hanna et al., 2024), die zukünftig durch generative KI verstärkt werden könnten (Open AI, 2022), auch wenn die Übertragung von menschlichen Beweisen in maschinelle Formen generell schwierig ist. Für das geometrische Beweisen – eine für KI-Sprachmodelle derzeit fast unmögliche Aufgabe – belegten Trinh et al. (2024) im Fachmagazin *Nature* allerdings kürzlich wegweisende Leistungen des KI-Programms AlphaGeometry beim Lösen von Aufgaben der internationalen Mathematikolympiade (IMO). Diese Entwicklungen könnten langfristig auch die Bedeutung der prozessbezogenen mathematischen Kompetenzen im schulischen Unterricht beeinflussen, da die Schülerinnen und Schüler in der Lage sein werden, bestimmte mathematische Prozesse gemeinsam mit künstlicher Intelligenz durchzuführen, ähnlich wie dies in der Vergangenheit durch die Einführung des Taschenrechners und digitaler Mathematik-Werkzeuge geschehen ist.

Zum Beispiel betrifft dies das Problemlösen. Wird das Arbeiten mit mathematischen Problemen durch die Unterstützung mit generativer KI vereinfacht und die Schülerinnen und Schüler können der KI Fragen zu komplexen Problem stellen, sie um Erklärungen bitten oder anhand von Schritt-für-Schritt-Lösungen eigene Lösungsansätze erstellen, dann wird es für sie noch wichtiger, mathematische Probleme präzise zu formulieren, zu identifizieren und über selbstregulative Fähigkeiten zu verfügen, um den kollaborativen, teils computerbasierten Problemlöseprozess zu überwachen (siehe z. B. Urban et al., 2024 in einer Studie mit Studierenden). Dies liegt daran, dass die Effektivität und Genauigkeit von KI-Technologien maßgeblich von der Klarheit und Genauigkeit der gestellten Fragen abhängt, wodurch sich die Schwerpunktsetzung in der Kompetenzvermittlung verändert. Denkbar ist, dass mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz auch bisher in der Schule nicht behandelte Klassen von Problemen bearbeitet werden können, die z. B. komplexere Darstellungen oder das Finden von Mustern in großen Anzahlen von Objekten erfordern (z. B. Helfrich-Schkarbanenko, 2023). In Lernumgebungen, die durch generative KI unterstützt werden, könnten daher die Entwicklung und Anwendung neuer KI-bezogener Heuristiken (die z. B. auf dem Verarbeiten großer Datenmengen mit maschinellem Lernen beruhen) an Bedeutung gewinnen (Helfrich-Schkarbanenko, 2023; Michalewicz & Fogel, 2004). Schülerinnen und Schüler sollten als Ausdruck moderner prozessbezogener Kompetenzen zusätzlich aber auch fachspezifische Werkzeugtechniken (z. B. Prompt-Techniken bzw. Techniken zur Optimierung der Mensch-KI-Interaktion) erwerben, um generative KI als Werkzeug des mathematischen Pro-

blemlösens (aber auch des Modellierens und des Beweisens) nutzen zu können. Hier sehen wir Potenzial für die Erforschung von langfristigen Effekten, die die Einführung von generativer KI in den Schulunterricht auf die Kompetenzentwicklung und die Weiterentwicklung von Curricula bereithält (vgl. Deutscher Ethikrat, 2023). Zusätzlich sollte darauf geachtet werden, dass der Einsatz von generativer KI beim mathematischen Arbeiten nicht dazu führt, dass Schülerinnen und Schüler die Motivation und die Fähigkeiten verlieren, komplexere Aufgaben, deren Lösungen nicht unmittelbar mit Hilfe von KI gefunden werden können, selbst zu lösen (Deutscher Ethikrat, 2023).

Leitgedanke 3: Der Einsatz von KI-Technologien im Mathematikunterricht sollte altersangemessen fokussiert werden.

Nicht außer Acht gelassen werden darf, dass der unterrichtliche Einsatz von KI-Technologien ethische, rechtliche und technologische Risiken birgt, z. B. in Bezug auf den Datenschutz, die Verletzung der Privatsphäre und den Verlust von Autonomie (SWK, 2024; Deutscher Ethikrat, 2023). Diese Risiken sind insbesondere auch vor dem Hintergrund der Altersangemessenheit des Einsatzes zu erwägen, wie z. B. das Impulspapier der Ständigen Wissenschaftlichen Kommission (2024) betont, das insbesondere die Textproduktion mit generativer KI in den Blick nimmt und vom Einsatz großer Sprachmodellen im Primarstufenbereich abrät. Auch die Empfehlungen der UNESCO legen eine Altersgrenze von 13 Jahren für den Einsatz von generativer KI im Unterricht fest (Miao, Holmes & UNESCO, 2023), sie richten sich allerdings nach dem von Open AI angegebenen und auf der U.S.-amerikanischen Gesetzgebung beruhenden Mindestalter zur Nutzung von ChatGPT. Andererseits lassen sich intelligente Tutoriensysteme (ITS), wie z. B. Subkraki zur schriftlichen Subtraktion (Zeller & Schmid, 2017) auch im Primarbereich als sinnvolle ergänzende Unterstützung im mathematischen Lernprozess der Schülerinnen und Schüler einsetzen. Insbesondere durch die Möglichkeiten der Sprachein- und -ausgabe bei generativen Sprache-zu-Text und Text-zu-Sprache KI-Modellen ist die Eingabe auch durch Schülerinnen und Schüler möglich, die noch keine hinreichende Schreib- und Lesekompetenz ausgebildet haben. Der Zugriff auf generative KI scheint daher prinzipiell für junge Schülerinnen und Schüler in absehbarer Zukunft möglich und könnte auch in diversen digitalen Lernumgebungen umgesetzt werden. Eine pseudonymisierte Texteingabe ist durch DSGVO-konforme KI-Einbindungen, wie sie etwa fobizz (fobizz.com) für den schulischen Bereich anbietet, möglich und die Plattform ist nach eigenen

Angaben rechtlich ohne Altersbeschränkung nutzbar. Es bleibt abzuwarten, ob derartige Angebote um die direkte Spracheingabe erweitert werden, insbesondere vor dem Hintergrund der potenziellen Gefahr des Klonens von Stimmen. Für die Grundschule scheint es also – anders als bei digitalen Medien und Werkzeugen – daher derzeit noch eine offene Frage zu sein, inwieweit KI-Technologien im Mathematikunterricht bereits eingesetzt werden können, und hier sehen wir die mathematikdidaktische Community gefordert, diese Frage aus wissenschaftlichen und pädagogischen Perspektiven zu erörtern.

Forschung zum Erwerb mathematischer Basiskompetenzen im Grundschulbereich unter den Bedingungen des Einsatzes von KI erscheint uns daher erforderlich, um fundierte wissenschaftliche Entscheidungen über den Einsatz bzw. die Einsatzbedingungen von KI-Technologien im Mathematikunterricht der Grundschule, aber auch in den weiterführenden Schulformen treffen zu können. Eine zu klärende Frage in dieser Hinsicht ist beispielsweise, ob und wie weit der Kompetenzerwerb der Schülerinnen und Schüler durch technisches Auslagern von mathematischen Tätigkeiten an (generative) KI positiv oder negativ beeinträchtigt wird. Für den Sekundarstufenbereich kann unter der Voraussetzung, dass bereits hinreichende mathematische Kompetenzen erworben wurden, die Nutzung von generativer KI im Mathematikunterricht erwogen werden. Dieser sollte jedoch immer in eine kritische Reflexion eingebettet werden, u. a. in Bezug auf den Datenschutz oder die Funktionsweise der Technologie und die Problematik, die sich für das Fach Mathematik, das stark auf Aspekten wie Strenge, Eindeutigkeit und mathematischer Korrektheit beruht, aus „Datenhalluzinationen“ von KI-Modellen ergibt (Buchholtz et al., 2023). Entsprechende Teile der Community sind also gefordert, unter diesen Bedingungen altersgerechte Formen von fachspezifischen KI-Anwendungen mitzudenken und die Möglichkeiten und Grenzen ihrer verantwortbaren Anwendung vor dem Hintergrund ethischer und pädagogischer Richtlinien zu diskutieren.

Einsatz von KI-Technologien aus der Perspektive von Lehrkräften

Leitgedanke 4: KI-Technologien können Lehrkräfte bei der Diagnose und Bewertung mathematischer Leistungen unterstützen, es ergeben sich jedoch auch (neue) Verantwortlichkeiten.

Neue Formen der Individualisierung durch den Einsatz von KI-Technologien werden möglich durch die grundlegende Bereicherung der Individualdiagnostik, die die Technologie bereithält. Dies geschieht etwa, wenn die Analyse von Schülerlösungen und die Identifizierung

von Lernschwierigkeiten im Mathematikunterricht in enger Ersetzung der Lehrkraft – d. h. für einen genau bestimmten Lehr- bzw. Lernabschnitt (Deutscher Ethikrat, 2023) – automatisiert werden, z. B. im intelligenten Tutorsystem (ITS) Subkraki zur schriftlichen Subtraktion (Zeller & Schmid, 2017). Lehrkräfte können dabei z. B. durch KI-basierte Lernplattformen oder ITS mit Lernprozessdaten wie der Bearbeitungsdauer von Aufgaben oder des Vorliegens eines bestimmten konzeptuellen Fehlertyps unterstützt werden (siehe etwa bereits das Beispiel eines nicht-KI-basierten interaktiven Schulbuchs von Hoch, 2020); diese ermöglichen ihnen wertvolle diagnostische Einblicke in die Lernprozesse der Schülerinnen und Schüler. Zusätzlich ermöglicht die (momentan noch angekündigte) Echtzeit-Verarbeitung von Videodaten oder Bildschirmaufnahmen bei multimodalen KI-Modellen eine Direkt-Lernassistenz einzelner Schülerinnen und Schüler, die auch adaptiv auf Lernausgangslagen und Fehler eingehen kann (Khan Academy, 2024). Lehrkräfte können also bei der Individualdiagnostik eine Entlastung erfahren, müssen allerdings über die entsprechenden Kenntnisse und Fähigkeiten verfügen, um Lernprozessdaten auf eine hinreichende Transparenz und Validität zu überprüfen (z. B. in Bezug auf, welche Daten eingegangen sind) und sie effizient und kritisch-reflektiert für die individuelle Unterstützung der Lernenden und Feedback zu nutzen. Gleichzeitig müssen sie die teilweise autonom arbeitenden KI-Lernassistenten der Schülerinnen und Schüler im Blick behalten. Hinsichtlich der Diagnose von Schülerfehlern und Fehlervorstellungen mathematischer Inhalte durch KI besteht aktuell noch großer Forschungsbedarf, denn noch können generative KIs wie ChatGPT mit der Bilderkennung handschriftliche Schülerrechnungen nicht ausreichend zuverlässig beurteilen, was in einem Versuch zur Fehlererkennung im Bereich der arithmetischen Basiskompetenzen z. B. zu vermehrten fehlerhaften Diagnosen von Schülerfehlern in der schriftlichen Multiplikation führte (Weber, 2024).

Eine ähnliche Verantwortlichkeit betrifft auch den Umgang mit Lernprozessdaten vor dem Hintergrund der Bewertung von Leistungen. Es besteht ein gewisses Potenzial zur KI-basierten Unterstützung von Lehrkräften bei der Leistungsmessung, wenn Schülerantworten zu mathematischen Aufgaben (die z. B. durch Lernplattformen bereitgestellt werden) teil-automatisiert bewertet werden können (Kasneci et al., 2023). Unter anderem ermöglicht die Unterstützung durch KI die Berücksichtigung einer großen Anzahl von Einzelleistungen und personalisierter Lernleistungen bei der Bewertung, wodurch die formative Funktion der Leistungsmessung insgesamt stärker berücksichtigt werden kann (Luzano, 2024). Dies könnte zu der Hoffnung An-

lass geben, dass eine „objektivierte“ Leistungsmessung möglich wird. Andererseits birgt eine stärker datengetriebene und KI-unterstützte Leistungsmessung das Risiko, dass standardisierte Aufgaben und Rechenfertigkeiten überbetont werden, da viele KI-Technologien vor allem prozedurale mathematische Fähigkeiten akkurat überprüfen (Luzano, 2024; Rasila et al., 2015). Dies könnte zu Nachteilen bei der Berücksichtigung des konzeptuellen Verständnisses mathematischer Inhalte führen, da viele KI-Technologien vor allem prozedurale mathematische Fähigkeiten überprüfen (Luzano, 2024; Rasila et al., 2015). Eine weitere Gefahr bei der Bewertung mathematischer Leistungen durch KI ist nicht zuletzt, dass die in Bewertungsinstrumenten verwendeten Algorithmen des maschinellen Lernens unbeabsichtigt Verzerrungen in den Daten, auf denen sie trainiert wurden, unterliegen (Baker & Hawn, 2021). Wenn zum Beispiel Trainingsdaten hauptsächlich aus Beispielen aus einer bestimmten demografischen Gruppe bestehen, könnten KI-Technologien Schülerinnen und Schüler aus anderen Gruppen ungenau bewerten. Der Umgang mit algorithmischen Verzerrungen und die Gewährleistung von Fairness bei KI-unterstützten Bewertungen ist somit entscheidend für die Wahrung der Chancengleichheit in der mathematischen Bildung (Luzano, 2024). Lehrkräfte müssen also bezüglich der schulischen Leistungsmessung die Möglichkeiten sowie ethischen und rechtlichen Grenzen des Einsatzes von KI-Technologien kennen und dürfen Leistungsbeurteilungen nicht einfach automatisieren. Aus ethischer Perspektive besteht ein breiter Konsens darüber, dass die abschließende Bewertung von Schülerleistungen immer in menschlicher Hand bleiben sollte, wie auch gegenwärtige Rahmenpapiere zum Einsatz von KI im Bildungsbereich betonen (U.S. Department of Education, 2023; SWK, 2024). Auch die im Sommer 2024 in Kraft tretende und nachhaltig Geltung beanspruchende EU-Verordnung zur Künstlichen Intelligenz (KI-VO) stuft KI-Systeme, die in der allgemeinen oder beruflichen Bildung zur Bewertung von Lernergebnissen eingesetzt werden können, aufgrund möglicher Diskriminierungen bereits als hochriskant ein, so dass Lehrkräfte über die rechtliche Rahmenbedingungen informiert sein sollten.

Leitgedanke 5: KI-Technologien können Lehrkräfte bei der Individualisierung mathematischer Lernprozesse unterstützen und potenziell entlasten.

Künstliche Intelligenz besitzt das Potenzial, Lehrkräfte bei der Entwicklung individualisierter Lernumgebungen zu unterstützen und Unterricht inklusiv zu gestalten. So können Lehrkräfte z. B. mit generativer KI effizient Aufgabenformulierungen an die individuel-

len Lernvoraussetzungen der Schülerinnen und Schüler anpassen oder individuelle Lernprozessdaten aus KI-gestützten Lernplattformen und ITS nutzen, um personalisierte Lernpfade zu erstellen (Clements & Samara, 2004; Simon, 1995). Diese Möglichkeiten der KI-gestützten Individualisierung mathematischen Lernens und die sich daraus möglicherweise ergebende Entlastung von Lehrkräften sollten empirisch befohrt und von der Fachdidaktik auch konzeptionell begleitet werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit durch Maschinelles Lernen und Deep Neural Networks generierte Lernpfade, die auf der Mustererkennung großer Datenmengen (möglicherweise Millionen von Trainingsdaten) basieren, tatsächlich personalisierte Vorschläge für individuelle Lernwege liefern können (Engelbrecht & Borba, 2023). Es gilt kritisch zu hinterfragen und empirisch zu prüfen, ob solche KI-generierten Lernpfade das Lernen einzelner Schülerinnen und Schüler angemessen fördern können oder ob sie lediglich auf Gruppenmustern basieren und somit die individuellen Bedürfnisse und Fähigkeiten der Lernenden möglicherweise nicht ausreichend berücksichtigen. Eine sorgfältige Evaluation der durch KI bereitgestellten Lernpfade ist daher unerlässlich, um sicherzustellen, dass diese tatsächlich einen Zugewinn für das individuelle Lernen bieten und nicht zu einer Vereinheitlichung führen. Hierbei müssen sowohl die technischen Möglichkeiten als auch die pädagogischen Implikationen der KI-gestützten Lernpfadgenerierung kritisch reflektiert werden, um eine bestmögliche Unterstützung für das Lernen jedes einzelnen Schülers und jeder einzelnen Schülerin zu gewährleisten. So dürfen sich Lehrkräfte nicht leichtfertig einfach auf die vorgeschlagenen Lernpfade der KI verlassen, sondern müssen die Lernpfade nach eigener Einschätzung fortwährend den Lernfortschritten der Schülerinnen und Schüler anpassen (Simon, 1995). Gleichzeitig bietet die Nutzung von KI-Technologien durch Lehrkräfte aber auch die Chance, ein adaptives Angebot an Lerninhalten und -materialien zu erstellen und direktes, auf didaktischen Kriterien basierendes formatives Feedback an jede Schülerin und jeden Schüler zu geben, was Lehrkräfte im Alltag entlasten kann, wie Haverkamp (2024) und Brüggemann (2024) anekdotisch berichten. Forschungsbedarf besteht also darin, herauszufinden, auf welche KI-basierten Individualisierungsformen Lehrkräfte für den Mathematikunterricht zurückgreifen, wie stark der wahrgenommene Faktor der Entlastung ist und inwieweit durch KI individualisierte und adaptiv gestaltete Lernumgebungen und Hilfestellungen von den Schülerinnen und Schülern angenommen werden und letztlich lernförderlich sind.

Die Verfügbarkeit der neuen Versionen generativer KI wie z. B. das große Sprachmodell GPT-4o und das

angekündigte GPT-5 dürften die Akzente der Individualisierung noch stärker in Richtung individueller sprachgesteuerter KI-Lernassistenten verschieben (Khan Academy, 2024) und damit noch deutlicher in Richtung einer direkten Schüler-KI-Interaktion. Unter anderem ermöglichen Echtzeit-Gespräche und -Übersetzungen beim Unterrichten sprachheterogener Lerngruppen einen reibungslosen Sprachwechsel im Unterricht und eröffnen damit neue Gestaltungsmöglichkeiten für die Berücksichtigung von Mehrsprachigkeit und konzeptioneller Mündlichkeit beim Mathematiklernen. Um das Potenzial von generativer (Sprache-zu-Sprache) KI für den (sprachsensiblen) Mathematikunterricht daher voll auszuschöpfen und die sich durch die zunehmend in Konkurrenz zur Lehrkraft tretende KI verändernde Rolle von Lehrkräften in diesem Mathematikunterricht zu klären, bedarf es ebenfalls weiterer Forschung (siehe Dilling et al., 2024). Die Unterstützungsmöglichkeiten für mehrsprachige Schülerinnen und Schüler bei der Bewältigung spezifischer Herausforderungen im Erwerb der mathematischen Fach- und Bildungssprache durch sprachgesteuerte KI erfordert Forschungsbemühungen und die Entwicklung passender Lernumgebungen.

Leitgedanke 6: KI-Technologien können (angehende) Lehrkräfte im Erwerb und in der Ausübung von Planungs-, Reflexions- und Analysekompetenzen unterstützen

In ihrer Unterrichtsplanung achten erfahrene Lehrkräfte auf eine optimale Passung zwischen dem Lernstand der Schülerinnen und Schüler und den Lerninhalten (Beck et al., 2008; König & Rothland, 2022). Lehramtsstudierenden, Lehrkräften im Vorbereitungsdienst und Lehrkräften auf frühen Karrierestufen (z. B. auch Seiteneinsteigerinnen und Seiteneinsteigern) mangelt es allerdings oft noch an Erfahrung und Routine, Unterrichtsstunden adaptiv zu planen und Lerneinheiten über einen längeren Zeitraum zu strukturieren. Zusätzlich kann auch die Auswahl passender Lernmaterialien im Rahmen der Unterrichtsvorbereitung eine Herausforderung darstellen (Thurn, 2019). Generative KI-Technologien können hier als digitale Assistenzwerkzeuge genutzt werden, um angehende Lehrkräfte in organisatorischer Hinsicht zu unterstützen, wie erste Studien beschreiben (Baytak, 2024; Karaman & Goksu, 2024), auch wenn die Qualität der erstellten Unterrichtsplanungen je nach technischem Modell noch variiert.

Auch einige der Autorinnen und Autoren des Beitrags haben konkret Lehramtsstudierenden ChatGPT als dialogische KI-Assistenz bei der Unterrichtsplanung und bei der Anpassung von Mathematikaufgaben zur

Verfügung gestellt (Buchholtz & Huget, in Vorbereitung; Huget & Buchholtz, 2024; Peters & Schorcht, 2024). Es erwiesen sich bei der Unterrichtsplanung in eng definierten Prompt-Settings insbesondere Rückfragen, die die generative KI innerhalb des Planungsdialogs an die Studierenden stellte (z. B. nach stofflichen Lernzielen, methodischer Gestaltung oder didaktischen Prinzipien, die berücksichtigt werden sollten) als besonders wertvoll für die Vermittlung unterrichtsplanungsbezogener Kompetenzen. Die gestellten Fragen unterstützten die Studierenden darin, ihre eigenen Planungen kritisch zu reflektieren und zu optimieren, was sich als essentiell für die Entwicklung planungsbezogener Kompetenzen und die Förderung von Reflexionsprozessen erwies.

Da der Mathematikunterricht selbst u. a. durch die Qualität des Lehr-Lern-Materials bestimmt wird, rückt auch die Generierung von Unterrichtsmaterialien und Aufgaben als Anwendungsfeld von generativer KI in den Blick. Sowohl angehende als auch praktizierende Lehrkräfte können beispielsweise Mathematikaufgaben vor dem Hintergrund der Lernvoraussetzungen von Schülerinnen und Schülern so verändern, dass Aufgabenmerkmale wie das kognitive Anforderungsniveau, der Lebensweltbezug oder der Bezug zur Fachsprache variiert, womit eine höhere Zugänglichkeit im Rahmen inklusiver Lernangebote erreicht werden kann. Auch hier kann generative KI als „Gesprächspartner“ im Planungsprozess dienen und Rückmeldungen geben. Hieraus ergibt sich auch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Frage, welche Impulse – z. B. spezifische Arten von Fragen, die große Sprachmodelle in Hinblick auf die Planung von Unterricht oder die Aufgabenvariation stellen – sich als besonders förderlich für den Erwerb von Lehrerkompetenzen erweisen. Auch muss geklärt werden, welche praktische Validität KI-unterstützte Unterrichtsplanungen und generiertes Unterrichtsmaterial aufweisen, da davon auszugehen ist, dass die sehr großen Mengen an Trainingsdaten der KI-Modelle Verzerrungen in Richtung standardisierter (oft lehrerzentrierter) Unterrichtsplanungen und -materialien bedingen. Im Sinne eines „garbage in, garbage out“-Prinzips ist zudem zu hinterfragen, inwieweit die für das Training von aktuellen KI-Tools genutzten Daten beispielsweise den Grad der kognitiven Aktivierung von Aufgaben hinreichend berücksichtigen, und wie gut bzw. schlecht die resultierende KI entsprechend in der Bewertung von kognitiver Aktivierung sein kann.

Zusätzlich erscheint die Nutzung von KI-Technologien bei der Analyse von Unterrichtsvideos ein wertvolles Werkzeug in der Lehrerbildung. Die Integration von Videoanalysetools in multimodale KI-Modelle, die direkte Sprachausgaben ermöglichen (z. B. GPT-4o),

könnte ein innovatives interaktives und selbstreguliertes Lernformat für die Lehrerausbildung bereithalten, das die Reflexions- und Analysekompetenzen der angehenden Lehrkräfte stärkt (Tarantini, 2023). Denkbar sind hier etwa Szenarien der automatisierten Szenenerkennung (z. B. zur Gestaltung von Unterrichtseinstiegen, zu Lehrkräfteinterventionen oder zum Umgang mit Fehlern im Mathematikunterricht), bei der die KI detaillierte Beschreibungen des Unterrichts liefert und die Aufmerksamkeit der angehenden Lehrkräfte gezielt auf Unterrichtshandlungen lenkt. Basierend auf den Inhaltsanalysen generativer KI ließen sich erneut geeignete Reflexionsfragen stellen, die die angehenden Lehrkräfte dazu bringen, eigene Handlungsalternativen zu entwickeln, oder Best-Practice-Modelle mit dem im Video gezeigten Unterricht zu vergleichen. Erste empirische Studien zur KI-basierten Erfassung von Merkmalen der Unterrichtsqualität, die auf der Verarbeitung bestehender Forschungsdaten beruhen, existieren hierzu bereits (Hou et al., 2024). Allerdings steht die potenzielle Verarbeitung von Videodaten von Unterricht bei diesem Forschungsansatz in Bezug auf die Erfassung von Aufmerksamkeitsmerkmalen oder affektiven Variablen im Klassenraum aus ethischer Hinsicht berechtigterweise in der Kritik (Deutscher Ethikrat, 2023).

Fazit

Unsere sechs Leitgedanken verdeutlichen die vielfältigen Möglichkeiten, aber auch die Herausforderungen, die mit dem Einsatz von KI-Technologien im Mathematikunterricht und in der professionellen Arbeit von Mathematiklehrkräften einhergehen. Es zeigt sich, dass KI-Technologien nicht als Ersatz für menschliche Kreativität und Expertise betrachtet werden sollten, sondern vielmehr als neues Werkzeug, das Lehrkräften im Zusammenspiel mit ihren mathematikdidaktischen Fähigkeiten neue Möglichkeiten für das Lehren, sowie Schülerinnen und Schülern das Lernen von Mathematik eröffnen kann. Gleichzeitig ist es unerlässlich, die Technologie kritisch zu betrachten und ihren möglichen Nutzen, aber auch ihre Anwendungen und Risiken empirisch zu erforschen, um evidenzbasierte Entscheidungen zur Weiterentwicklung des Mathematikunterrichts treffen zu können.

Da die Einsatzmöglichkeiten von KI sehr vielfältig sind, wird KI auf sehr vielen Ebenen Implikationen für die mathematikdidaktische Forschung und auch Lehre bereithalten. Dies umfasst auch die Forschung, in der KI beispielsweise im Kontext der Datenverarbeitung oder Manuskriptgenerierung genutzt werden kann und bereits wird. Wir haben uns in diesem Bei-

trag allerdings zunächst nur auf Implikationen und Forschungsbedarfe im Bereich des schulischen Lehrens und Lernens beschränkt. Eine zentrale Frage für uns als Community, die sich hierbei aber stellt, ist, inwieweit KI als eigenständiger Bereich in der Mathematikdidaktik zu behandeln ist – beispielsweise in einem Arbeitskreis – oder ob diese Technologie vielmehr als Querschnittsthema in bestehende Diskurse und Arbeitsgruppen integriert werden sollte.

Unabhängig davon ist es von großer Bedeutung, die Kompetenzen von Lehrkräften aller Schulstufen im Umgang mit KI im Mathematikunterricht in den Blick zu nehmen. Um die Chancen dieser Technologie für das Lehren und Lernen von Mathematik nutzbar zu machen, müssen Lehrkräfte befähigt werden, KI kritisch, reflektiert und innovativ einzusetzen und dabei sowohl ethische Gesichtspunkte als auch Aspekte des Datenschutzes zu berücksichtigen.

Der Kompetenzerwerb von Lehrkräften im Studium sollte daher Basiskompetenzen zum Umgang mit KI-Technologien im Allgemeinen sowie speziell für das Unterrichten des Fachs Mathematik umfassen. Dazu gehört einerseits die Fähigkeit, den Output von KI zu hinterfragen und inkorrekte Ergebnisse zu erkennen, andererseits aber auch die Kompetenz, generative KI didaktisch sinnvoll in den Unterricht zu integrieren. Darüber hinaus müssen ethische Aspekte als verbindliche Ausbildungsanteile in die Lehrerbildung aufgenommen werden, um sicherzustellen, dass der Einsatz von KI im Mathematikunterricht reflektiert und verantwortungsvoll erfolgt (siehe auch Hein et al., 2024).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Integration von KI-Technologien in den Mathematikunterricht ein komplexes Thema ist, das einer differenzierten Betrachtung bedarf. Die hier vorgestellten Leitgedanken bieten einen ersten Rahmen für die weiteren Diskussionen und Forschungsansätze in diesem Bereich. Es gilt nun, die aufgeworfenen Fragen und Herausforderungen in einem interdisziplinären Dialog zwischen Fachdidaktik, Fach, Bildungswissenschaften, Informatik und Schulpraxis zu bearbeiten, um das Potenzial von KI-Technologien für das Lehren und Lernen von Mathematik optimal zu nutzen und gleichzeitig mögliche Risiken zu minimieren. Nur so kann sichergestellt werden, dass der Einsatz von KI im Mathematikunterricht einen echten Zugewinn für Lehrende und Lernende bietet und zu einer Verbesserung der Unterrichtsqualität beiträgt.

Literatur

- Baker, R., & Hawn, A. (2021). Algorithmic bias in education. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 32, 1052–1092. DOI:10.1007/s40593-021-00285-9

- Baytak, A. (2024). The content analysis of the lesson plans created by ChatGPT and Google Gemini. *Research in Social Sciences and Technology*, 9(1), 329–350. DOI:10.46303/ressat.2024.19
- Beck, E., Baer, M., Guldemann, T., Bischoff, S., Brühwiler, C., Müller, P., Niedermann, R., Rogalla, M., & Vogt, F. (2008). *Adaptive Lehrkompetenz. Analyse und Struktur, Veränderbarkeit und Wirkung handlungssteuernden Lehrerwissens*. Waxmann.
- Brüggemann, J. (2024). *KI-gestütztes Feedback für mathematische Argumentationen mit Fiete*. mathemia.de/blog/2024-02-09-fiete/
- Buchholtz, N., & Huget, J. (in Vorb.). Möglichkeiten für die Anwendung von ChatGPT für angehende Mathematiklehrkräfte – Von guten und schlechten Prompts. Erscheint in: *Mitteilungen der mathematischen Gesellschaft Hamburg*.
- Clements, D. H., & Sarama, J. (2004). Learning trajectories in mathematics education. *Mathematical Thinking and Learning*, 6, 81–89. DOI:10.1207/s15327833mtl0602_1
- Deutsche Telekom Stiftung (2021). *KI@Bildung: Lehren und Lernen in der Schule mit Werkzeugen Künstlicher Intelligenz*. www.telekom-stiftung.de/aktivitaeten/schule-und-ki
- Deutscher Ethikrat. (2023). *Mensch und Maschine – Herausforderungen durch Künstliche Intelligenz: Stellungnahme*. www.ethikrat.org/fileadmin/Publikationen/Stellungnahmen/deutsch/stellungnahme-mensch-und-maschine.pdf
- Dilling, F., Holten, K., Pielsticker, F. & Witzke, I. (2024). Aushandlungs- und Argumentationsprozesse fördern durch den Einsatz generativer KI-Sprachmodelle beim schulischen Mathematiklernen? Erste Einsichten und Perspektiven aus der Empirie. *Mitteilungen der Gesellschaft für Didaktik der Mathematik*, 116, 14–21.
- Engelbrecht, J., & Borba, M. C. (2024). Recent developments in using digital technology in mathematics education. *ZDM Mathematics Education* 56, 281–292. DOI:10.1007/s11858-023-01530-2
- Gilles, F. (2024). *ChatGPT als persönlicher Lernassistent? Entwicklung von Prompts zur Bereitstellung von Lernhilfen durch künstliche Intelligenz*. Unveröffentlichte Seminararbeit, Universität Hamburg.
- Hanna, G., Larvor, B., & Yan, X. K. (2024). Using the proof assistant Lean in undergraduate mathematics classrooms. *ZDM Mathematics Education*. DOI:10.1007/s11858-024-01577-9
- Haverkamp, H. (2024). Lernförderliches Feedback: Entlastung beim individuellen Feedback mit Fiete.ai. In A. König & J. Mosbach (Hrsg.), *Künstliche Intelligenz als Unterrichtsassistent. Wie KI-Tools das Lehrerleben erleichtern* (S. 30–31). Friedrich-Verlag.
- Hein, L., Högemann, M., Illgen, K.-M., Stattkus, D., Kochon, E., Reibold, M.-G., Eckle, J., Seiwert, L., Beinke, J. H., Knopf, J., & Thomas, O. (2024). ChatGPT als Unterstützung von Lehrkräften: Einordnung, Analyse und Anwendungsbeispiele. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 61, 449–470. DOI:10.1365/s40702-024-01052-9
- Helfrich-Schkarbanenko, A. (2023). *Mathematik und ChatGPT. Ein Rendezvous am Fuße der technologischen Singularität*. Springer.
- Helmke, A. (2009). *Unterrichtsqualität und Lehrerprofessionalität: Diagnose, Evaluation und Verbesserung des Unterrichts* (Neubearb., 1. Aufl.). Kallmeyer.
- Hershkovitz, A., Noster, N., Siller, H.-S., & Tabach, M. (2024). Learning analytics in mathematics education: The case of feedback use in a digital classification task on reflective symmetry. *ZDM Mathematics Education*. DOI:10.1007/s11858-024-01551-5
- Hoch, S. (2020). Prozessdaten aus digitalen Schulbüchern als Instrument der mathematikdidaktischen Forschung. Theorie – Praxis – Empirie am Beispiel des Bruchzahlkonzepts. nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20201218-1554567-1-1
- Hou, R., Fütterer, T., Bühler, B., Bozkir, E., Gerjets, P., Trautwein, U., & Kasneci, E. (2024). Automated assessment of encouragement and warmth in classrooms leveraging multimodal emotional features and ChatGPT. [arXiv:2404.15310](https://arxiv.org/abs/2404.15310)
- Huget, J., & Buchholtz, N. (2024). Gut gepromptet ist halb geplant – ChatGPT als Assistenten bei der Unterrichtsplanung nutzen. In A. König, & J. Mosbach (Hrsg.), *Praxisratgeber Künstliche Intelligenz als Unterrichtsassistent: Wie KI-Tools das Lehrerleben erleichtern* (S. 8–10). Friedrich-Verlag.
- Ifenthaler, D. (2015). Learning analytics. In J. M. Spector (Hrsg.), *The SAGE encyclopedia of educational technology* (Bd. 2, S. 447–451). Thousand Oaks: Sage.
- Jia, J., Wang, T., Zhang, Y., & Wang, G. (2024). The comparison of general tips for mathematical problem solving generated by generative AI with those generated by human teachers. *Asia Pacific Journal of Education*, 44(1), 8–28. DOI:10.1080/02188791.2023.2286920
- Karaman, M. R., & Goksu, I. (2024). Are lesson plans created by ChatGPT more effective? An experimental study. *International Journal of Technology in Education (IJTE)*, 7(1), 107–127. DOI:10.46328/ijte.607
- Kasneci, E., Seßler, K., Küchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F., ... & Kasneci, G. (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. *Learning and Individual Differences*, 103, 102274.
- Katter, V., & Huget, J. (2024, 6. März). *ChatGPT und quadratische Funktionen: Fachdidaktische Perspektiven und Anwendungen* [Vortrag]. 57. Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Mathematik.
- Khan Academy (2024, 13. Mai). GPT-4o (Omni) math tutoring demo on Khan Academy [Video]. youtu.be/IvXZCocyU_M
- Kirsch, A. (1977). Aspekte des Vereinfachens im Mathematikunterricht. *Didaktik der Mathematik*, 5(2), 87–101.
- Klinger, M. (2019). „Besser als der Lehrer!“, – Potenziale CAS-basierter Smartphone-Apps aus didaktischer und Lernenden-Perspektive. In G. Pinkernell & F. Schacht (Hrsg.), *Digitalisierung fachbezogen gestalten: Tagungsband der Herbsttagung des Arbeitskreises Mathematikun-*

- terricht und digitale Werkzeuge vom 28. bis 29. September 2018 an der Universität Duisburg-Essen. Franzbecker.
- König, J., & Rothland, M. (2022). Stichwort: Unterrichtsplanungskompetenz. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 25, 771–813. DOI:10.1007/s11618-022-01107-x
- Luzano, J. (2024). Assessment in mathematics education in the sphere of artificial intelligence: A systematic review on its threats and opportunities. *International Journal of Academic Multidisciplinary Research*, 8(2), 100–104.
- Maddigan, P., & Susnjak, T. (2023). Chat2VIS: Generating data visualizations via natural language using ChatGPT, Codex and GPT-3 large language models. *IEEE Access*, 11, 45181–45193. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3274199
- Maio, F., Holmes, W., & UNESCO (2023). Guidance for generative AI in education and research. UNESCO. DOI:10.54675/EWZM9535
- Michalewicz, Z., & Fogel, D. B. (2004). *How to solve it: Modern heuristics*. Springer. DOI:10.1007/978-3-662-07807-5
- Open AI. (2022). *Solving (some) formal math olympiad problems*. openai.com/index/formal-math/
- Pardos, Z. A., & Bhandari, S. (2024). ChatGPT-generated help produces learning gains equivalent to human tutor-authored help on mathematics skills. *PLOS ONE*, 19(5). DOI:10.1371/journal.pone.0304013
- Peters, F. & Schorcht, S. (2024, 4. März). GPT-Netzwerke im Task Design – Einsatz von Communicative KI-Agents als multiprofessionelles Team [Poster]. 57. Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Mathematik. DOI:10.13140/RG.2.2.16091.99362
- Pham Van Long, P., Vu, D. A., Hoang, N. M., Do, X. L., & Luu, A. T. (2023). ChatGPT as a math questioner? Evaluating ChatGPT on generating pre-university math questions. In *Proceedings of the 39th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing (SAC 2024)*. arXiv:2312.01661
- Rasila, A., Malinen, J., & Tiitu, H. (2015). On automatic assessment and conceptual understanding. *Teaching Mathematics and Its Applications*, 34, 149–159. DOI:10.1093/TEAMAT/HRV013
- Schorcht, S., Baumanns, L., Buchholtz, N., Huget, J., Peters, F., & Pohl, M. (2024). Lernt die KI nun Sehen und Zeichnen? Herausforderungen der Bildgenerierung und Bildinterpretation mit ChatGPT in der Mathematikdidaktik. *Mitteilungen der Gesellschaft für Didaktik der Mathematik*, 116, 22–29.
- Simon, M. A. (1995). Reconstructing mathematics pedagogy from a constructivist perspective. *Journal for Research in Mathematics Education*, 26, 114–145.
- Sommerhoff, D., Lutz, T., & Rott, B. (2024). Künstliche Intelligenz in der Mathematikdidaktik. In *Beiträge zum Mathematikunterricht 2024*. 57. Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Mathematik. WTM
- Svendsen, C. (2023). *ChatGPT – Hype oder bereits ein weiteres nützliches Werkzeug?* blog.24translate.de/chatgpt-hype-oder-bereits-ein-weiteres-nuetzliches-werkzeug
- [SWK] Ständige Wissenschaftliche Kommission der Kultusministerkonferenz (2024). *Large Language Models und ihre Potenziale im Bildungssystem: Impulspapier der Ständigen Wissenschaftlichen Kommission der Kultusministerkonferenz*. www.swk-bildung.org/content/uploads/2024/02/SWK-2024-Impulspapier_LargeLanguageModels.pdf
- Tarantini, E. (2023). Reflective teacher education in the digital age. In D. Ifenthaler, D. G. Sampson, & P. Isaías (Hrsg.), *Open and inclusive educational practice in the digital world. Cognition and exploratory learning in the digital age* (pp. 213–231). Springer. DOI:10.1007/978-3-031-18512-0_13
- Thurn, S. (2019). Lehrer als „Weltmeister im Komplexitätsmanagement“. *Pädagogik*, 7–8 (2019).
- Trinh, T. H., Wu, Y., & Le, Q. V. (2024). Solving olympiad geometry without human demonstrations. *Nature*, 625, 476–482. DOI:10.1038/s41586-023-06747-5
- Urban, M., Děchtěrenko, F., Lukavský, J., Hrabalová, V., Svacha, F., Brom, C., & Urban, K. (2024). ChatGPT improves creative problem-solving performance in university students: An experimental study. *Computers & Education*, 215, 105031. DOI:10.1016/j.compedu.2024.105031
- U.S. Department of Education, Office of Educational Technology (2023). *Artificial intelligence and the future of teaching and learning: Insights and recommendations*. Washington, DC.
- Weber, R. (2024). *Einsatzmöglichkeiten von künstlicher Intelligenz als Unterstützung von Mathematiklehrkräften bei diagnostischen Tätigkeiten*. Unveröffentlichte Masterarbeit, Universität Hamburg.
- Wissenschaftsrat (2023). *Empfehlungen zur Lehramtsausbildung im Fach Mathematik*. Köln. DOI:10.57674/7epfp50
- Zeller, C., & Schmid, U. (2017). Automatic generation of analogous problems to help resolving misconceptions in an intelligent tutor system for written subtraction. Vortrag auf der 24th International Conference on Case Based Reasoning, Atlanta, GA, 31th October – 2nd November 2016

Nils Buchholtz, Universität Hamburg
nils.buchholtz@uni-hamburg.de

Sebastian Schorcht, Technische Universität Dresden
sebastian.schorcht@tu-dresden.de

Lukas Baumanns, Technische Universität Dortmund
lukas.baumanns@tu-dortmund.de

Judith Huget, Universität Hamburg
judith.huget@uni-hamburg.de

Norbert Noster, Universität Würzburg
norbert.noster@uni-wuerzburg.de

Benjamin Rott, Universität zu Köln
brott@uni-koeln.de

Hans-Stefan Siller, Universität Würzburg
hans-stefan.siller@uni-wuerzburg.de

Daniel Sommerhoff, IPN Kiel
sommerhoff@leibniz-ipn.de