

Mehr als nur Antworten: KI-gestützte Lernbegleitung im Mathematikunterricht

Christian Urff, Pädagogische Hochschule Weingarten, 2025

Erstveröffentlichung: 29. November 2025; überarbeitet: 23. Juli 2026

Zusammenfassung: KI-gestützte Lernbegleitung kann mathematisches Lernen unterstützen, zugleich aber Denkarbeit verdrängen. Der Beitrag leitet vier Anforderungen ab: fachdidaktische Fundierung, adaptive Dosierung, metakognitive Aktivierung und unterrichtliche Einbettung. Da die Forschung überwiegend mit älteren Lernenden durchgeführt wurde, sind sie für die Primarstufe zunächst als forschungsbasierte Gestaltungsannahmen zu verstehen.



Die Ausgangslage

Generative Künstliche Intelligenz wird im Bildungsdiskurs mit großen Erwartungen oder mit ebenso großen Befürchtungen verbunden. Inzwischen liegen zahlreiche, methodisch und inhaltlich sehr unterschiedliche Studien vor, die für die Gestaltung

von KI-Lernbegleitung erst Folgerungen zulassen. Meta-Analysen berichten von signifikant positiven Effekten KI-gestützter Systeme auf Lernleistungen, Motivation und höhere Denkprozesse (Wang & Fan, 2025; Deng et al., 2025; Alemdag, 2025; Wu & Yu, 2024; Zheng et al., 2023). Eine aktuelle Meta-Analyse zu generativer KI in der Mathematik zeigt moderate mittlere Effektstärken (Liu et al., 2025). Allerdings treten diese positiven Effekte unter sehr unterschiedlichen Bedingungen auf, und einige Studiendesigns sind methodisch fragwürdig. Bei der Interpretation sind daher mögliche Publikationsverzerrungen und die Qualität der eingeschlossenen Studien zu berücksichtigen.

Eine aktuelle systematische Übersicht zu intelligenten Tutorsystemen (Létourneau et al., 2025) zeigt, dass lediglich etwa 14 % der Studien Grundschüler:innen betreffen; die weit überwiegende Mehrheit der vorliegenden Studien wurde mit älteren Schüler:innen oder Studierenden durchgeführt (Kuo et al., 2025; Liu et al., 2025; Son, 2024). Für die Grundschule spezialisierte Forschung liegt bisher nur begrenzt vor, weshalb viele der folgenden Überlegungen weniger auf direkten Studienergebnissen für diese Zielgruppe basieren als auf theoretischen Überlegungen und auf Befunden älterer Altersgruppen. Dieser Beitrag sichtet und ordnet die vorliegenden Erkenntnisse und macht sie für den Mathematikunterricht der Grundschule nutzbar.

Grundsätzlich ist es (ebenso wie „Digitale Medien“ an sich keinen Lerneffekt haben) wenig sinnvoll, einen „Lerneffekt mit KI“ als Eigenschaft der KI-Technologie an sich misszuverstehen, anstatt nach der jeweils zugrunde liegenden Lernumgebung und didaktischen Vorstrukturierung zu fragen (Dinsmore & Fryer, 2026; KirschnerED, 2025). Der Beitrag fragt, unter welchen Bedingungen KI-gestützte Lernbegleitung mathematische Lernprozesse in der Primarstufe unterstützt und wann auf ihren Einsatz verzichtet werden sollte.

Diese Überlegungen bilden die Grundlage für die Entwicklung und Erprobung appintegrierter KI-gestützter Lernbegleitung im Rahmen des Projektes PRIMA-KI. Sie sind ausdrücklich nicht endgültig, sondern mit neuen KI-Modellen, neuen empirischen Befunden und den darauf basierenden pädagogischen Anwendungen weiterentwickelt.

Theoretischer Rahmen

Bevor konkrete Gestaltungsprinzipien diskutiert werden, strukturieren drei

theoretische Perspektiven die folgenden Gestaltungsprinzipien: Cognitive Load Theory, Zone der nächsten Entwicklung sowie die Unterscheidung von prozeduralem und konzeptuellem Wissen.

Cognitive Load Theory

Die Cognitive Load Theory (Sweller, 2020) beschreibt die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses als zentrale Rahmenbedingung für die Gestaltung von Lernmedien. Für KI-gestützte Systeme hat diese Begrenzung unmittelbare Konsequenzen: Generative KI kann Informationen in hoher Geschwindigkeit und großem Umfang präsentieren – Texte, Bilder, Erklärungen, Visualisierungen, Animationen. Doch wenn Lernende mit Informationen und Reizen überflutet werden, ohne diese lernrelevant verarbeiten zu können, verfehlt auch die inhaltlich beste Information ihr Ziel.

Dies optimal zu gestalten ist eine zentrale Herausforderung des Designs von KI-Lernbegleitung. Gestufte Hilfe (Scaffolding) – die dosierte Bereitstellung von Hilfen und Erklärungen – ist aus Sicht der Cognitive Load Theory hier entscheidend. KI-Tutoren müssen Impulse, Hilfen und Unterstützung so dosieren, dass die Arbeitsgedächtnisbelastung im optimalen Bereich bleibt (Cosentino et al., 2025). Zu viel Information zum falschen Zeitpunkt ist nicht neutral, sondern schadet dem Lernen. Ein KI-Tutor muss Informationen *auswählen*, *dosieren* und gegebenenfalls *zurückhalten* – nicht nur passende Informationen produzieren.

Zone der nächsten Entwicklung: Adaptivität erfordert diagnostische Kompetenz

Die Zone der nächsten Entwicklung (Vygotsky) beschreibt den Bereich zwischen dem, was ein Kind allein bewältigen kann, und dem, was es mit Hilfe eines kompetenteren Partners bewältigen kann. Für das Design von KI-Tutorsystemen ist dieses Konzept von fundamentaler Bedeutung: Das System müsste fortlaufend einschätzen, was ein Kind selbstständig und mit Unterstützung bewältigen kann, und dann Impulse in genau dieser nächsten Zone anbieten – nicht zu leicht (Unterforderung), nicht zu schwer (Überforderung).

Adaptive Systeme müssen diese Einschätzung nicht einmalig, sondern kontinuierlich leisten (Wu et al., 2025; Kuo et al., 2025). Sie müssen aus den Eingaben der Lernenden ableiten, wo deren Verständnis liegt, welche Fehler auf welche Vorstellungen zurückgehen, welche Art von Missverständnis zum Fehler

geführt hat und welcher nächste Impuls produktiv wäre. Adaptivität kann Unterstützung passender machen als rein deterministisch agierende tutorielle Systeme, die auf Basis einfacher Regeln mehr oder weniger passende bzw. oberflächliche Rückmeldungen erzeugen. Ob sie tatsächlich lernwirksam ist, hängt von der diagnostischen Grundlage und der Qualität der daraus abgeleiteten Hilfen ab.

Prozedurales und konzeptuelles Wissen: Verschiedene Ziele, verschiedene Unterstützung

Aus diesen beiden theoretischen Perspektiven ergibt sich eine weitere Differenzierung, die für das Design von KI-Tutoren entscheidend ist: Die Art der angemessenen Unterstützung hängt fundamental davon ab, welches Lernziel gerade verfolgt wird. Prozedurales Wissen – *Wie löse ich diese Aufgabe?* – braucht andere Unterstützung als konzeptuelles Wissen – *Warum funktioniert das so?*

Ein Kind, das Rechenflüssigkeit übt, etwa die schnelle Addition oder Subtraktion, benötigt häufiges, passgenaues Feedback zu seinen Ergebnissen. Ein Kind, das gerade Zahlverständnis entwickelt, muss hingegen durch gezielte Fragen und Handlungsmöglichkeiten dazu angeregt werden, sein Verständnis selbst zu konstruieren und weiterzuentwickeln. Es sollte eigene Lösungswege entwickeln, darstellen und begründen. Ein KI-System, das diese Unterscheidung nicht treffen kann, riskiert, dass seine Unterstützung kontraproduktiv wirkt, etwa indem es bei konzeptuellem Lernen zu schnell Lösungen liefert oder bei prozeduralem Üben mit unnötigen Impulsen und Anregungen das Arbeitsgedächtnis belastet. Makransky et al. (2024) zeigen dies auch: Ein speziell didaktisch hinsichtlich dieser Prinzipien trainiertes Modell förderte in der Studie konzeptuelles Verständnis, Vertrauen und Freude am Lernen deutlich mehr als ein generisches großes Sprachmodell, und diese Effekte blieben im Follow-up stabil. Dies bedeutet, dass auch große, mächtige Sprachmodelle nicht unbedingt fachdidaktisches Wissen automatisch gezielt anwenden können, ohne fachlich vorstrukturiert zu sein.

Diese drei theoretischen Perspektiven – die Begrenzung des Arbeitsgedächtnisses, die Notwendigkeit adaptiver Positionierung in der Zone der nächsten Entwicklung und die Differenzierung nach Lernzielen – bilden einen Rahmen, in dem die folgenden Gestaltungsprinzipien verortet sind. Zugleich machen sie deutlich, warum KI-Lernbegleitung kein einfaches technisches Problem ist: Sie erfordert Systeme, die nicht nur antworten können, sondern die über ein Modell des Lernenden, des

Lerngegenstands und des Lernprozesses verfügen.

Risiko der Auslagerung: Wenn KI Denkarbeit übernimmt

Die bisherige Darstellung der Studienlage könnte den Eindruck erwecken, dass KI-gestützte Lernbegleitung ein überwiegend positives Potenzial besitzt, das lediglich noch technisch optimiert werden muss. Doch es zeigt sich ein ambivalenteres Bild. In einigen Studien zeigte sich, dass der unkontrollierte und „falsche“ Einsatz generativer KI beim Lernen nicht nur weniger wirksam sein kann als erhofft, sondern dass er grundlegende kognitive Fähigkeiten abkürzen kann und Lernen dadurch eher hindert.

Cognitive Offloading: Wenn Unterstützung zur Abhängigkeit wird

Das grundlegendste Problem lässt sich als *kognitive Auslagerung (Cognitive Offloading)* fassen: Lernende lagern kognitive Anstrengung an die KI aus, statt sie selbst zu vollziehen. Gerlich (2025) dokumentiert in einer aktuellen Analyse eine negative Korrelation ($r = -0,75$) zwischen intensiver KI-Nutzung und der Ausprägung kritischen Denkens, wobei dieser Zusammenhang bei jüngeren Lernenden besonders ausgeprägt ist. Die Studie zeigt einen Zusammenhang, belegt aber nicht, dass intensive KI-Nutzung kritisches Denken schwächt (zumal sie auch methodisch kritisiert werden kann). Sie begründet eine Auslagerungshypothese, die experimentell und längsschnittlich geprüft werden muss.

Dieses Risiko zeigten Bastani et al. (2025) in einer kontrollierten Interventionsstudie. Schüler:innen, die während des Übens unregulierten Zugang zu vollständigen KI-Lösungen erhielten, erzielten kurzfristig höhere Leistungen. Im anschließenden Test ohne KI lag die unreguliert unterstützte Gruppe unter dem Niveau einer Kontrollgruppe ohne jegliche KI-Nutzung. Die Autor:innen sprechen von einem *Kompetenzverlust (De-Skilling)*; der Befund betrifft dieses Setting und belegt noch keinen dauerhaften, über die Studie hinausreichenden Kompetenzverlust. Parallel dazu dokumentieren Lernanalysen aus KI-basierten Nachhilfesystemen, dass ein Teil der Lernenden versucht, Aufgabensequenzen „durchzuklicken“, ohne sich inhaltlich mit ihnen auseinanderzusetzen (Jančařík et al., 2023).

Auch Dinsmore und Fryer (2026) sowie Gisiger (2025) argumentieren aus lernpsychologischer Perspektive, dass generative KI (hier gemeint in Form von Chatbots, die nicht etwa durch spezielle Systemprompts für Lernbegleitung vorstrukturiert sind) dazu verführt, den anstrengenden Prozess der eigenen Wissenskonstruktion abzukürzen. Wer direkt die Lösung konsumiert, spart Anstrengung, baut aber nicht unbedingt tragfähige Wissensstrukturen auf, vor allem wenn er die eingesparte Denkenergie nicht für höhere Denkleistungen sinnvoll nutzt. Man könnte auch sagen: Lernerfolg hängt mit Anstrengung zusammen und wenn diese Anstrengung vermieden wird, gibt es auch weniger nachhaltiges Lernen. Viele Anbieter von Chatbots haben bereits darauf reagiert und bieten mittlerweile einen „Lernmodus“ an, bei dem der Chatbot keine Lösungen direkt ausgibt, sondern Rückfragen stellt und dialogisch mit dem Benutzer die Inhalte betrachtet.

Die Höflichkeitsfalle

Zu diesem strukturellen Risiko tritt ein subtileres, aber bedeutsames Phänomen. Abdulsalam und Aroyehun (2025) zeigen in ihrer Analyse, dass große Sprachmodelle beim Tutoring zwar Expert:innen-Niveau erreichen können, dabei aber von sich aus zu höflich und zu unterstützend agieren. Diese übermäßige Höflichkeit korrelierte in der Studie negativ mit der Lernqualität. Die KI vermeidet es, Lernende zu frustrieren oder auf Fehler hinzuweisen, und weicht daher von sich aus echten Herausforderungen aus. Doch produktive Anstrengung – das temporäre Erleben von Schwierigkeit bei gleichzeitiger Unterstützung – ist ein zentraler Motor für Lernen, insbesondere für die Entwicklung von konzeptuellem Verständnis.

Chudziak und Kostka (2025) identifizieren ein verwandtes Problem: Viele aktuelle KI-Systeme tendieren zu einem *preskriptiven* Interaktionsstil – sie geben vor, leiten an und lösen, statt Raum für eigene Denkprozesse zu lassen. Systeme, die zu früh intervenieren (*Reactive Feedback*), riskieren damit, genau jene (meta-)kognitiven Prozesse zu unterbinden, die sie eigentlich fördern sollten. Die Analyse realer Nachhilfedialoge durch Wang et al. (2025) bestätigt dieses Bild auch für jüngere Lernende: Primarstufenschüler:innen reagierten durchaus positiv auf interaktive Fragen, blieben aber tendenziell eher passiv-reaktiv und zeigten keinen nachhaltigen Lerneffekt, wenn der Tutor zu monologisch und lösungszentriert agierte.

Das Paradoxon optimaler Unterstützung

Diese Befunde verdichten sich zu einem Paradoxon, das als Leitproblem für die

Gestaltung von KI-Lernbegleitung verstanden werden kann: Je effizienter ein KI-System Aufgaben lösen kann und Hilfe anbietet, desto größer ist die Gefahr, dass es das eigenständige Denken ersetzt, statt es zu fördern. Dieses Paradoxon ist schwer aufzulösen. Es bedeutet, dass ein guter KI-Tutor manchmal bewusst *weniger* tun muss, als er könnte. Er muss Frustration („being stuck“ als Kern mathematischen Denkens, Mason, Burton & Stacey, 1982) in dosierten Maßen zulassen, Lösungen zurückhalten, unvollständige Hinweise geben und Wartezeit erzeugen. Dies bedeutet, dass das KI-System teilweise gegen die Mechanismen arbeiten muss, die generative KI so eindrucksvoll macht.

Ein unvorstrukturierter Chatbot – etwa ein frei zugängliches Sprachmodell ohne pädagogische Rahmung – wird zur Antwortmaschine und kann echtes, verständnisförderndes Lernen eher verhindern als ermöglichen. Die folgenden Prinzipien zielen darauf, Unterstützung zu dosieren und die Denkarbeit beim Kind zu halten.

Gestaltungsprinzipien als Antwort auf das Risiko der Verkürzung des Lernens

Die Spannung zwischen dem Potenzial adaptiver KI-Lernbegleitung und den beschriebenen Risiken des Cognitive Offloading erfordert ein Zusammenspiel mehrerer Gestaltungsebenen, die aufeinander aufbauen: eine fachdidaktische Fundierung des Systems als zentrale Voraussetzung für Diagnostik und Förderung (Primat der Fachdidaktik), die adaptive Dosierung als Kernmechanismus des Feedbacks, die metakognitive Aktivierung als Qualitätsmerkmal und hybride Einbettung (menschliche Aufsicht, „Lehrkraft in the loop“) als Wirksamkeitsbedingung.



Fundierung: Fachdidaktisches Wissen als zentrale Voraussetzung

Die erste und grundlegendste Gestaltungsebene betrifft die Wissensbasis des Systems. Generative KI erzeugt sprachlich und formal beeindruckende Ausgaben, aber fachdidaktisch sind diese häufig oberflächlich, wenig problemorientiert oder sogar fehlerhaft, wenn sie nicht gezielt gesteuert werden (Schneider, 2025). Das ist keine Implementierungsschwäche, die sich beiläufig beheben ließe; es ist eine Konsequenz der Architektur großer Sprachmodelle. Deren Training basiert auf den verfügbaren Daten im Internet, und insbesondere für mathematikdidaktische Fragestellungen fand dabei in der Regel keine qualitative Kuratierung statt. Literaturanalysen zum Einsatz generativer KI in der Mathematikbildung weisen daher immer wieder auf die geringe theoretische Fundierung und Fehleranfälligkeit vieler Systeme hin (Almheiri et al., 2025; Awang et al., 2025; Holmes & Tuomi, 2022; Opesemowo & Adewuyi, 2024).

Cárdenas et al. (2025) identifizieren in ihrer systematischen Analyse die fehlende theoretische Rahmung als eines der zentralen Hindernisse für lerneffektive KI-

Tutorsysteme. Fachdidaktische Fundierung betrifft sowohl die inhaltliche Korrektheit von Aufgaben und Erklärungen (hier werden die Systeme immer besser) als auch die Art und Weise, wie ein System auf Lernende reagiert. Denn Fachexpertise und Tutoring-Expertise sind nicht dasselbe. Macina et al. (2025) zeigen empirisch, dass Personen mit hervorragenden mathematischen Fähigkeiten nicht automatisch gutes Tutoring betreiben. Sie können Aufgaben korrekt lösen, erkennen aber nicht immer, wo die Schwierigkeit für Lernende liegt, welche Fehlvorstellung einem Fehler zugrunde liegt oder welcher Impuls in einer bestimmten Lernsituation produktiv wäre. Für KI-Systeme bedeutet das: Fachliches Wissen in den Prompt zu integrieren, reicht nicht aus. Das System muss auch über fachdidaktisches Wissen verfügen, also über das Wissen, *wie* Kinder mathematische Konzepte aufbauen, welche typischen Irrwege und Missverstehensprozesse es gibt und welche Interventionen an welcher Stelle im Lernprozess wirksam sind.

Dass dieser Unterschied praktisch bedeutsam ist, belegen mehrere konvergierende Befunde. Makransky et al. (2024) zeigen auf Basis der Generative Learning Theory, dass ein speziell didaktisch trainiertes Modell konzeptuelles Verständnis, Vertrauen und Freude am Lernen signifikant stärker fördert als ein generisches großes Sprachmodell, und dass diese Effekte auch im Follow-up stabil bleiben. Erfolgreiche Tutorsysteme wie ChatTutor oder spezifische Frameworks (z.B. der Lernmodus von ChatGPT) basieren daher explizit auf pädagogischen Theorien wie der Social Cognitive Theory oder dem Evidence-Centered Design (Cohn et al., 2025; Dwivedi & Rejina, 2025). Und Studien zu GeoGebra- und KI-gestützten Lernumgebungen demonstrieren, dass konzeptuelles Verständnis und Selbstwirksamkeit nur dann steigen, wenn Fach- und Fachdidaktik explizit in die Systemgestaltung einfließen, wenn also nicht bloß „Technik on top“ gesetzt wird (Canonigo, 2024).

Ein KI-Lernbegleiter für den Mathematikunterricht der Primarstufe benötigt mindestens folgende fachdidaktische Wissensgrundlagen, die entweder über den Systemkontext (Prompting) oder durch ein spezialisiertes Modelltraining bereitgestellt werden müssen:

Erstens ein *Modell der mathematischen Kompetenzentwicklung* für den jeweiligen Inhaltsbereich. Die KI muss „wissen“, dass Zahlverständnis nicht durch Auswendiglernen von Fakten entsteht, sondern durch den Aufbau von Vorstellungen und dass es für diesen Aufbau typische Entwicklungsverläufe und Vorläuferfähigkeiten gibt. Ohne dieses Wissen bleibt jede Adaptation oberflächlich: Das System kann allenfalls den Schwierigkeitsgrad variieren, aber nicht die Qualität seiner Impulse an den Verständnisstand anpassen.

Zweitens *Fehler- und Strategietaxonomien*, die typische Schülerwege und -irrtümer abbilden (Nauryzbayev et al., 2023; Bewersdorff et al., 2023). Die Diagnose von Fehlvorstellungen, wie etwa die Verwechslung von Position und Wert im Stellenwertsystem oder das zählende Rechnen als verfestigte Strategie, ist eine fachdidaktische Kernkompetenz, die ein System erwerben muss, wenn es über die Feststellung „richtig/falsch“ hinausgehen soll. Ein Beispiel: Häufig schlagen auch große Sprachmodelle bei Fehlern explizit die Strategie „zähle doch“ vor, wenn weder eine entsprechende Anweisung noch fachdidaktischer Kontext vorgegeben wurde.

Drittens bedarf es *expliziter Regeln und Vorgaben*, welche Hilfen in welcher Lernphase und bei welcher Art von Schwierigkeit sinnvoll sind. Die oben eingeführte Unterscheidung zwischen prozeduralem und konzeptuellem Lernen kann beispielsweise eine Leitlinie sein: Routineförderung erfordert andere Interventionsstrategien als der Aufbau begrifflichen Verständnisses. Und ein System sollte erkennen, ob ein Fehler ein „Flüchtigkeitsfehler“ ist oder ein Verständnisproblem zugrunde liegt. Einbezogen werden kann hier eine Lernhistorie, damit die generative KI auf vorherige Eingaben und Lernstände angepasst antworten kann und Dauerschleifen vermieden werden.

Viertens muss das System eine Adaption nicht nur hinsichtlich des Schwierigkeitsgrades leisten, sondern auch hinsichtlich *unterschiedlicher Denkwege*, mit denen Lernende zum Ergebnis gelangen können. Kinder lösen mathematische Probleme auf vielfältige Weise, und das ist auch wünschenswert. Ein fachdidaktisch fundierter KI-Tutor erkennt alternative Strategien, bewertet sie hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit, fragt ggf. nach und kann Kinder gegebenenfalls darin bestärken oder behutsam zu effizienteren Wegen anregen.

Die Bereitstellung dieses fachdidaktischen Wissens ist aufwändig. Kleinere, spezialisierte Modelle benötigen dadurch unter Umständen weniger Rechenleistung und lassen sich eher lokal auf dem Gerät oder in datenschutzkonformen Infrastrukturen betreiben. Damit lassen sich zugleich Nachhaltigkeitsprobleme (Energieverbrauch) und Datenschutzerfordernisse adressieren, bei nachgewiesener Eignung für die jeweilige Aufgabe.

Fachdidaktische Fundierung ist also nicht nur ein wünschenswertes Qualitätsmerkmal, sondern die notwendige Bedingung dafür, dass adaptive Unterstützung überhaupt als solche funktionieren kann. Ohne sie bleibt ein KI-Tutor – um Schneiders (2025) pointierte Formulierung aufzugreifen – ein „sprachbegabter

Zufallsgenerator“, der gelegentlich hilfreiche, häufig aber unspezifische oder sogar irreführende Impulse produziert.

Dosierung: Adaptive Scaffolding und das Prinzip „Erst du - dann ich“

Auf der Grundlage fachdidaktischen Wissens wird die zweite Gestaltungsebene möglich: die adaptive Dosierung von Impulsen und Hilfen. Dies ist der Mechanismus, der KI-Lernbegleitung von einer bloßen Antwortmaschine unterscheidet. Die empirische Befundlage deutet darauf hin, dass KI-gestützte Lernumgebungen besonders dann Potenzial für Lern- und Verstehensprozesse erzeugen, wenn sie adaptiv auf Lernstand, Fehler und Strategien reagieren, statt richtige Antworten auszugeben.

In der Studie zu TALPer etwa profitierten leistungsschwächere Fünftklässler:innen besonders stark von adaptiver Unterstützung, während leistungsstärkere Schüler:innen komplexere Interaktionsmuster mit dem KI-Lernbegleiter entwickelten (Kuo et al., 2025). Mit einem System konnten also unterschiedliche Lernvoraussetzungen gut bedient werden. Liu et al. (2025) zeigen bei einem vergleichbaren System signifikante Leistungsgewinne in Textaufgaben, wobei interessanterweise die wahrgenommene Qualität der Unterstützung und nicht deren bloße Verfügbarkeit den stärksten Einfluss auf Motivation und Lernwirkung hatte. Die systematische Übersicht von Son (2024) bestätigt positive Effekte gut konzipierter intelligenter Tutorsysteme auf mathematische Lernleistungen, insbesondere wenn diese adaptiv auf individuelle Lernbedürfnisse reagieren. Generative Systeme können Rückmeldungen an Aufgabe, Eingabe und bisherigen Lernverlauf des einzelnen Kindes anpassen.

Entscheidend ist dabei die Reihenfolge von Denken und Unterstützung. Die bisherige Forschung zu großen Sprachmodellen beim Lernen weist deutlich darauf hin, dass KI-Feedback besonders dann wirksam ist, wenn Lernende zunächst eigene Lösungsversuche unternehmen (Kumar et al., 2023). In deren Studie führten selbst seltene fehlerhafte Erklärungen des Sprachmodells nach vorherigen eigenen Lösungsversuchen noch zu Lernzuwächsen, ohne dass Teilnehmende systematisch falsche Strategien übernahmen. Der Befund stützt für dieses Setting das Prinzip, Feedback erst nach einem eigenen Lösungsversuch anzubieten. Cohn et al. (2025) betonen in ihrem theoretischen Rahmenwerk für LLM-basierte pädagogische Agenten explizit die Notwendigkeit angeleiteten Entdeckens statt direkter

Antworten (guided discovery over direct answers). Und auch Ruan et al. (2020) zeigen in ihrer Studie zu narrativbasierten Chatbot-Tutoren: Lernzuwächse wurden vor allem dann erzielt, wenn das System interaktives Feedback und Hinweise gab statt direkter Lösungen.

Im Bereich des selbstregulierten Lernens weisen einige Studien darauf hin, dass adaptives, KI-gestütztes Scaffolding im Unterschied zu statischen Hilfesequenzen die Qualität von Selbststeuerungsprozessen beim Lernen verbessern kann und Vorteile gegenüber einem Konzept „gleiche Hilfen für alle“ hat (Liu et al., 2025; Wu et al., 2025). Generative KI muss also so eingebunden und vorstrukturiert werden, dass sie adaptiv und individualisiert auf die Eingaben der Lernenden eingeht und nicht nur vorgefertigte Impulse anbietet.

Zugleich zeigen die in Abschnitt 3 diskutierten Überlegungen, dass Hilfen nicht nur individualisiert, sondern auch *begrenzt* sein müssen. Bastani et al. (2025) demonstrieren, dass unregulierter Zugang zu vollständigen Lösungen langfristig schadet, es sei denn, die KI wird so reguliert, dass sie nur schrittweise Hinweise gibt und damit Raum für eigene Lösungsversuche lässt. Ein konsequentes Ausblenden der Hilfe (Fading) – das planmäßige Zurückziehen von Unterstützung – ist daher ein notwendiger Bestandteil des Systemdesigns. Wenn Schüler:innen zu viele Hinweise anfordern, muss das System darauf reagieren können, indem es Hilfen dosiert, zeitlich staffelt und gegebenenfalls reduziert, um Abhängigkeit zu vermeiden.

Ein dabei immer wieder beobachtetes Problem sind Halluzinationen und nicht geeignete Rückmeldungen der KI. Neue Multi-Agent-Ansätze und LLM-as-Judge-Verfahren zeigen jedoch, dass sich Qualität und Zuverlässigkeit von Scaffolds durch Selbstüberprüfungsverfahren verbessern und Halluzinationen beim Feedback deutlich reduzieren lassen (Cohn et al., 2025; Gonnermann-Müller et al., 2025; Qian et al., 2026). Neuere Modelle und zusätzliche Prüfverfahren können Fehler weiter reduzieren. Ihre Verlässlichkeit muss dennoch für Modell, Version, Aufgabe und Lerngruppe jeweils geprüft werden.

Ein KI-Lernbegleiter sollte daher konsequent nach dem Prinzip „Erst du – dann ich“ arbeiten: Zunächst wird ein eigener Lösungsversuch eingefordert. Die KI kommt erst bei Bedarf hinzu – auf Anfrage oder automatisch bei Fehlern – und fragt dann nach Ideen, Teilstrategien und Beobachtungen. Erklärungen werden an vorhandene Verständnisgrundlagen angedockt. Vollständige Musterlösungen bleiben die Ausnahme und werden als Reflexionswerkzeug genutzt, nicht als primäres Lernformat. Und der KI-Lernbegleiter sollte dabei nicht übermäßig loben oder

ausweichen, sondern konstruktive und informative Rückmeldung geben.

Aktivierung: Metakognition, kritisches Denken und der Tutor als Spiegel

Die dritte Gestaltungsebene geht über die Dosierung von Hilfen hinaus und zielt auf die Qualität der kognitiven Prozesse, die durch die Interaktion angeregt werden. Chatbots und KI-Systeme können nicht nur als Hinweisgeber und Aufgabenerklärer fungieren. Sie können darüber hinaus Prozesse des Planens, Überwachens und Reflektierens im Problemlöseprozess anregen, wenn sie darauf ausgelegt werden. Die Meta-Analyse von Wu et al. (2025) zeigt, dass Chatbots selbstreguliertes Lernen technisch, sozial und reflexiv unterstützen können, sofern ihre Scaffolds an Modelle des selbstregulierten Lernens gekoppelt sind. Guo et al. (2025) bestätigen in ihrer systematischen Übersicht, dass KI-Systeme grundlegende psychologische Bedürfnisse nach Autonomie, Kompetenz und sozialer Eingebundenheit erfüllen können als zentrale Faktoren für Motivation und Engagement.

In Studien zu sogenannten *teachable agents* zeigen Song et al. (2024), dass Lernende KI-gestützte Systeme als Lernbegleiter, Moderator und kollaborativen Problemlöser wahrnehmen können, wenn sie ihre eigenen Erklärungen an diese Agenten richten. Das Prinzip des Lernens durch Erklären lässt sich damit in KI-gestützte Umgebungen übertragen und für das Lernen nutzen. Gleichzeitig zeigt sich allerdings, dass viele heutige generative KI-Systeme zentrale tutorielle Rollen – beispielsweise das gezielte Anregen von Planung, Strategiewahl und Reflexion – ohne spezielle Prompts oder Nachtraining noch nicht zuverlässig erfüllen und eher zu dem bereits diskutierten preskriptiven Stil neigen (Chudziak & Kostka, 2025; Contel & Cusi, 2025). Dies unterstreicht die Notwendigkeit der Vorstrukturierung von KI-Systemen, damit sie proaktiv metakognitive Scaffolds einsetzen, die über reaktives Feedback hinausgehen.

Ein wesentlicher Aspekt metakognitiver Aktivierung besteht auch darin, Lernende zur kritischen Prüfung von KI-Antworten selbst zu befähigen. In einer Lernumgebung im Rahmen eines [Mathetags an einer Grundschule](#) wurde beobachtet, dass Kinder, die die Erfahrung machten, dass KI-Antworten fehlerhaft sein können, eine kritisch-prüfende Haltung entwickelten und Antworten nicht mehr unreflektiert akzeptierten (Helal et al., 2024). Dies ist eine Fähigkeit, die Kinder bereits in der Primarstufe üben können und die angesichts der zunehmenden Durchdringung des Alltags mit KI-generierten Inhalten von wachsender Bedeutung ist.

Ein KI-Lernbegleiter kann als metakognitiver Partner konzipiert werden, der diese Prozesse systematisch anregt. Die Tutorin stellt Fragen wie „Was ist dir aufgefallen?“, „Welche Strategie hast du probiert?“, „Warum glaubst du, dass das funktioniert?“. Sie regt die Reflexion über Fehler an: „Welche Idee von vorher könnte hier helfen?“ Und sie kann, wo sinnvoll, Teach-back-Elemente integrieren: Kinder erklären der KI, was sie verstanden haben, und die KI spiegelt zurück, fragt nach und vertieft. Dadurch regt die KI eigene Erklärungen, Prüfungen und Reflexionen an, statt selbst als allwissende Erklärerin aufzutreten.

Einbettung: Hybride Arrangements als Wirksamkeitsbedingung

Die vierte und letzte Gestaltungsebene betrifft die Frage, in welchem Rahmen KI-Lernbegleitung stattfindet. Mehrere Studien berichten Vorteile hybrider Arrangements, in denen KI die Lehrkraft nicht ersetzt, sondern entlastet. Eine allgemeine Überlegenheit gegenüber gut gestaltetem menschlichem oder KI-gestütztem Feedback ist damit noch nicht belegt. Dies kann etwa durch passgenaue Scaffolds im Problemlöseprozess oder Echtzeit-Analysen geschehen, damit Lehrkräfte mehr Zeit für pädagogische Interaktion und Beziehungsgestaltung haben (Wezendonk & Veldhuis, 2024; Gonnermann-Müller et al., 2025).

Eine Studie von Eedi in Kooperation mit Google DeepMind (2025) illustriert das Potenzial hybrider Ansätze unmittelbar: Während KI-Unterstützung allein zu Lernzuwächsen von 4,5 Prozentpunkten führte, verdoppelten sich diese auf 10 Prozentpunkte, wenn die Lehrkraft die KI-Vorschläge überprüfte und nutzte. Die Lehrkraft fungiert hier nicht allein als Kontrollorgan, sondern als pädagogische Instanz, die die KI-Impulse in den Kontext des Unterrichts, der Klasse und des einzelnen Kindes einordnet. In der Meta-Analyse von Kaliisa et al. (2025) zeigte sich, dass KI-Feedback nicht weniger wirksam ist als menschliches Feedback, aber auch nicht systematisch überlegen. Besonders vielversprechend sind also Hybridansätze, die verlässliches, direktes und barrierearmes KI-Feedback mit gerahmtem Feedback durch menschliche Lehrkräfte kombinieren. Cosentino et al. (2025) bestätigen, dass solche hybriden Feedback-Modelle das Potenzial haben, die kognitive Belastung zu reduzieren und differenzierte Informationsverarbeitungsstrategien zu unterstützen.

Weitere Studien stützten die Wirksamkeit bei der Unterstützung von Lehrkräften. Der CoPilot beispielsweise unterstützt menschliche Lehrkräfte in Echtzeit und führt zu signifikant besseren mathematischen Lernergebnissen bei jüngeren Schüler:innen. Dies gilt besonders dort, wo Lehrkräfte sonst schwächere Feedbackqualität zeigen, etwa aufgrund fachfremden Unterrichts (Wang et al.,

2024). Kestin et al. (2025) stellen fest, dass KI-Tutoren, die auf didaktischen Prinzipien aktiven Lernens aufbauen, in bestimmten Unterrichtsphasen gezielt zusätzliche Übung und Feedback zum Präsenzunterricht bieten können.

Aus der Perspektive der hybriden Einbettung ergeben sich mehrere Konsequenzen für das Systemdesign. Die Generierung von Feedback muss auf Basis fachdidaktisch fundierter Informationen erfolgen und darf nicht dem Zufall überlassen werden. Lehrkräfte benötigen Dashboards und Einstellungsmöglichkeiten, um zu sehen, wo Schüler:innen stehen, welche Hilfen die KI gegeben hat und wie diese Hilfen gewirkt haben. Die KI kann Vorschläge für Aufgaben, Hilfen oder erste Diagnosen machen – die Entscheidung bleibt beim Menschen. Besonders aussichtsreich ist dabei der *mikrodidaktische* Bereich des Unterstützens auf Aufgabenebene beim Problemlösen, in dem Lehrkräfte bei einer heterogenen Klasse oft nicht alle Kinder an den entscheidenden Stellen zeitnah unterstützen können. In dem systematischen Review von Eti, Mosia & Egara (2026) zeigte sich, dass KI besonders wirksam ist, wenn sie Fehlvorstellungen erkennt, passende Hinweise gibt und Lernende schrittweise zu selbstständigem Problemlösen führt.

Allerdings bleibt die sinnvolle Einbindung von Lehrkräften in Design und Einsatz von KI-Tutorsystemen bisher oft unzureichend mitgedacht. Guerino et al. (2023) sowie Wezendonk und Veldhuis (2024) betonen, dass lehrerzentrierte Gestaltungsansätze und entsprechende KI-Literacy-Programme notwendig sind, um praktische Classroom-Integration und Akzeptanz zu gewährleisten. Professionalisierung und Fortbildung zur Einbindung, Orchestrierung und Nutzung von KI sind Voraussetzung für einen verantwortlichen Einsatz (Holmes et al., 2018; KMK, 2024; Wang & Nie, 2023) und sollten daher in der Lehrkräfteaus- und -weiterbildung integriert werden. Fortbildung sollte technische Grundlagen sowie pädagogische Chancen, Risiken und Prüfkriterien umfassen. Zentral bleibt dabei das fachdidaktische Wissen als Grundlage für die Prüfung und Orchestrierung der KI als Assistenz im Lernsetting.

KI als Impulsgeber für mathematische Entdeckungen

Die bisherigen Gestaltungsprinzipien beschreiben, wie KI-Lernbegleitung *intern* funktionieren sollte, also in der Interaktion zwischen System und Lernendem. Ebenso wichtig ist jedoch die Frage, wie sich diese Interaktion in das *Gesamtarrangement* mathematischen Lernens einfügt. KI soll und darf nicht dazu führen, dass Kinder nur noch auf Bildschirme starren und mit ihnen

interagieren. Forschung zu *Tangible Interfaces* und sozialen Robotern zeigt, dass KI auch Interaktion in der physischen Welt anregen kann (Ligthart et al., 2023). KI sollte als Anstoßgeber für mathematische Aktivitäten dienen und dabei die Repräsentationsebenen nach Bruner nutzen.

Die KI kann Handlungen mit Material sowie Skizzen, Notizen oder Fotos einbeziehen und dazu gezielte Fragen stellen. Beispielsweise bei der Modellierung von Sachaufgaben in der App „[Rechengeschichten](#)„. Hier können neben der Spracheingabe auch Skizzen, Notizen und Fotos der Modellierung mit dem KI-Lernbegleiter besprochen werden. Für den Primarbereich liegen hier deutlich weniger Studien als für Sekundarstufe und Hochschule vor, aber die vorhandenen Ergebnisse machen vorsichtig optimistisch: Kinder können von generativer KI beim Lernen profitieren, wenn Lernumgebungen sinnvoll gestaltet sind – auch hinsichtlich der Verknüpfung digitaler Begleitung und analoger Lernumgebung (Hwang, 2022; Listyaningrum et al., 2024; Mott et al., 2023; Rumbelow & Coles, 2024; Yim & Su, 2025).

KI-gestützte Objekterkennung bei Cuisenaire-Stäben sowie die Erkennung von Zeichnungen und Notizen können dazu beitragen, dass Kinder ihr Handeln zunehmend mit abstrakten mathematischen Repräsentationen verknüpfen (Rumbelow & Coles, 2024). KI-gestütztes Üben kann Rechenflüssigkeit gezielt erhöhen und erzielt dabei größere Flüssigkeitsgewinne als reine Memorierungsansätze, muss aber bei Kindern mit Rechenschwierigkeiten sorgfältig mit anderen Übungsformen kombiniert werden (Samuelsson, 2023). Adaptive Systeme für Kinder mit Dyskalkulie zeigen vielversprechende Ergebnisse bei der Aufrechterhaltung von Motivation und Engagement (Hocine et al., 2023; Holmes, 2024). Und narrative sowie gamifizierte Ansätze verdienen besondere Beachtung: Ruan et al. (2020) zeigen, dass storytelling-basierte Chatbot-Tutoren Engagement und Lerngewinne fördern können, und Sayed et al. (2022) bestätigen signifikante Verbesserungen insbesondere bei leistungsschwächeren Schüler:innen durch adaptive, gamifizierte Inhalte.

Kinder sollen mathematische Aussagen – auch und gerade von KI – kritisch prüfen, begründen und miteinander diskutieren (Kortenkamp, 2024; Aufenanger, 2023). KI-Lernbegleitung in der Grundschule sollte daher vor allem als Anstoßgeber für reichhaltige mathematische Aktivitäten dienen, die – ausgerichtet an fachdidaktischen Überlegungen – digitale und analoge Handlungen miteinander verbinden.

Ethische und strukturelle Rahmenbedingungen

Ethische Anforderungen an KI-Lernbegleitung

Die bisherigen Gestaltungsprinzipien zielen auf die lernwirksame Ausgestaltung von KI-Tutorsystemen. Doch Lernwirksamkeit allein ist kein hinreichendes Kriterium, insbesondere nicht, wenn Kinder die Lernenden sind. Ethische Fragen sind für das Lernen mit generativer KI grundlegend, und sie gehen über den häufig im Vordergrund stehenden Datenschutz hinaus. Holmes et al. (2021) fordern ein gemeinschaftlich entwickeltes Ethik-Rahmenwerk, das Aspekte wie Fairness, Transparenz, Agency und pädagogische Verantwortung umfasst. Die Kultusministerkonferenz (KMK, 2024) empfiehlt für Grund- und Förderschulen explizit einen vorsichtigen, forschungsbasierten Einsatz von KI mit Fokus auf Basiskompetenzen, Inklusion, Chancengerechtigkeit und datenschutzkonforme, altersangemessene Lösungen.

Dass die bisherige Forschung hier Lücken aufweist, zeigen Scoping Reviews zu KI und *Human Flourishing*: Die Forschungslage ist stark leistungsorientiert und auf Lerneffekte ausgerichtet, während ethische, metakognitive und lehrkraftbezogene Perspektiven unterbelichtet bleiben (Fock & Siller, 2025). Almheiri et al. (2025) sowie Cárdenas et al. (2025) identifizieren ethische Herausforderungen und Skalierungsprobleme als zentrale Hindernisse für den breiten Einsatz von KI-Tutorsystemen. Zudem zeigen Arbeiten zu psychologischem Profiling mit großen Sprachmodellen (Rosenfelder et al., 2025), wie treffgenau Modelle aus Texten Persönlichkeits- und Wertemuster ableiten können. Dies macht deutlich, welches Missbrauchspotenzial in intransparenten Systemen steckt. Gulz et al. (2021) betonen zudem die Notwendigkeit, Adaptivität mit inklusiver Pädagogik und Barrierefreiheit zu verbinden, ohne Lernende mit besonderen Bedürfnissen zu stigmatisieren.

Aus diesen Befunden und Forderungen lassen sich konkrete ethische Anforderungen an einen verantwortlichen KI-Lernbegleiter ableiten. Er muss *datensparsam arbeiten* und psychologische Profilbildung vermeiden. Dies lässt sich durch lokale Verarbeitung, getrennte Datenbestände und die Beschränkung auf notwendige Daten unterstützen. Er muss *barrierearm* sein und multimodale Interaktion (Sprache, Text, Bild) für diverse Lernbedürfnisse nutzen (Hocine et al., 2023), wobei gezielt benachteiligte Lernende bei der Gestaltung in den Blick genommen werden. Seine *Funktionsweise* muss in Grundzügen erklärbar und nachvollziehbar sein. Und

er muss Schüler:innen zur kritischen Prüfung von KI-Antworten anregen und dazu beitragen, dass kritisches Denken gestärkt wird statt geschwächt. Der übergeordnete Grundsatz lautet: **Der Lernbegleiter soll Selbsttätigkeit und Entscheidungsspielräume der Lernenden stärken.**

Das SKILL-Modell als Orientierungsrahmen

Für das Projekt PRIMA-KI wurde das [SKILL-Rahmenmodell](#) (Structured Competence-based Integration of Learning-supportive AI Systems) für den Einsatz generativer KI bei jüngeren Kindern entwickelt. Es bietet eine Orientierung für die Frage, wie offen oder vorstrukturiert KI-Systeme in verschiedenen Lernkontexten eingesetzt werden sollten. Die Grundaussage des Modells besteht darin, dass die Vorstrukturierung und Kontrolle der KI umso stärker sein muss, je näher die generative KI direkt mit dem Lernprozess in Verbindung steht – wobei zusätzlich der Grad der Kompetenzen der Kinder im Umgang mit den Ausgaben der KI berücksichtigt wird.

Damit soll das Risiko verringert werden, zentrale Denkleistungen – wie den Aufbau von Zahlverständnis oder eigener Problemlösestrategien – an das System auszulagern. Das SKILL-Modell operationalisiert damit die in diesem Beitrag entwickelten Gestaltungsprinzipien – insbesondere die Spannung zwischen adaptiver Unterstützung und dem Schutz eigenständigen Denkens – in eine anwendbare Struktur, die als Grundlage für die Gestaltung von KI-gestützten Lernumgebungen genutzt werden kann.

Fazit und Ausblick

Für die Zukunft ergeben sich mehrere offene Forschungsfragen. Es fehlen Langzeitstudien, die KI-gestützte Lernbegleitung über den Zeitraum einzelner Interventionen hinaus untersuchen – insbesondere die Frage, ob adaptives Scaffolding tatsächlich zu nachhaltigem Kompetenzaufbau führt oder ob sich De-Skilling-Effekte erst mit zeitlicher Verzögerung zeigen. Es fehlen Studien, die die spezifischen Bedingungen der Primarstufe – geringere Lesekompetenz, andere Interaktionsmuster, Zusammenspiel mit konkretem Material – systematisch berücksichtigen. Und es fehlt an Forschung zu der Frage, wie Lehrkräfte KI-Tutorsysteme tatsächlich in ihren Unterricht integrieren – nicht unter Laborbedingungen, sondern im Alltag einer heterogenen Grundschulklasse mit begrenzter Infrastruktur.

Im Projekt PRIMA-KI entstehen auf Basis der hier formulierten Grundprinzipien aktuell verschiedene appintegrierte KI-Lernbegleitungen, die im Rahmen des Design-Based Research erforscht, weiterentwickelt und optimiert werden. Aus diesen Erprobungen sollen Erkenntnisse gewonnen werden, mit denen das mathematische Lernen von Kindern verbessert werden kann.

Literatur

Abdulsalam, R. O., & Aroyehun, S. (2025). Large language models approach expert pedagogical quality in math tutoring but differ in instructional and linguistic profiles (arXiv:2512.20780). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.20780>

Alemdag, E. (2025). The effect of chatbots on learning: A meta-analysis of empirical research. *Journal of Research on Technology in Education*, 57(2), 459–481. <https://doi.org/10.1080/15391523.2023.2255698>

Aleven, V., Roll, I., McLaren, B. M., & Koedinger, K. R. (2016). Help Helps, But Only So Much: Research on Help Seeking with Intelligent Tutoring Systems. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 26(1), 205–223. <https://doi.org/10.1007/s40593-015-0089-1>

Almheiri, A. S. B., Albastaki, H., & Alrashdan, H. (2025). AI-based tutoring systems in education. *Advances in Computational Intelligence and Robotics Book Series*, 185–210. <https://doi.org/10.4018/979-8-3373-0847-0.ch007>

Aru, J., & Laak, K.-J. (2025). Developing an AI-based General Personal Tutor for education. *Trends in Cognitive Sciences*, 29(11), 957–960. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2025.09.010>

Aufenanger, S., Herzig, B., & Schiefner-Rohs, M. (2023). Künstliche Intelligenz und Schule. Aufgaben für Unterricht und die Organisation (von) Schule. In C. de Witt, C. Gloerfeld, & S. E. Wrede (Hrsg.), *Künstliche Intelligenz in der Bildung* (S. 199–218). Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-40079-8_10

Awang, L. A., Yusop, F. D., & Danaee, M. (2025). Current practices and future direction of artificial intelligence in mathematics education: A systematic review. *International Electronic Journal of Mathematics Education*, 20(2), em0823.

<https://doi.org/10.29333/iejme/16006>

Bach, K. M., Reinhold, F., & Hofer, S. (2025). Unlocking math potential in students from lower SES backgrounds – using instructional scaffolds to improve performance. *npj Science of Learning*, 10(1).

Bastani, H., Bastani, O., Sungu, A., Ge, H., Kabakcı, Ö., & Mariman, R. (2025). Generative AI without guardrails can harm learning: Evidence from high school mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(26), 2422633122.

Bewersdorff, A., Seßler, K., Baur, A., Kasneci, E., & Nerdel, C. (2023). Assessing student errors in experimentation using artificial intelligence and large language models: A comparative study with human raters. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 5, 100177. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100177>

Buchholtz, N., Schorcht, S., Baumanns, L., Huget, J., Noster, N., Rott, B., Siller, H.-S., & Sommerhoff, D. (2024). Damit rechnet niemand! Sechs Leitgedanken zu Implikationen und Forschungsbedarfen zu KI-Technologien im Mathematikunterricht. *Mitteilungen der Gesellschaft für Didaktik der Mathematik*, 117.

Canonigo, A. M. (2024). Levering AI to enhance students' conceptual understanding and confidence in mathematics. *Journal of Computer Assisted Learning*, 40(6), 3215–3229. <https://doi.org/10.1111/jcal.13065>

Cárdenas, R., Vásquez, H. G. E., Gamboa, D. A. P., Arteaga-Arcentales, E., & Carrera, J. E. M. (2025). Exploring AI-powered adaptive learning systems and their implementation in educational settings: A systematic literature review. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 8(4), 832–842. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i4.7961>

Chudziak, J. A., & Kostka, A. (2025). AI-powered math tutoring: Platform for personalized and adaptive education. *Lecture Notes in Computer Science*, 462–469. https://doi.org/10.1007/978-3-031-98465-5_58

Cohn, C., Rayala, S., Srivastava, N., Fonteles, J., Jain, S., Luo, X., Mereddy, D., Mohammed, N., & Biswas, G. (2025). A theory of adaptive scaffolding for LLM-based pedagogical agents. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2508.01503>

Contel, F., & Cusi, A. (2025). Investigating the Role of ChatGPT in Supporting

Metacognitive Processes During Problem-Solving Activities. *Digital Experiences in Mathematics Education*, 11(1), 167–191.

<https://doi.org/10.1007/s40751-024-00164-7>

Cosentino, G., Anton, J., Sharma, K., Gelsomini, M., Giannakos, M. N., & Abrahamson, D. (2025). Generative AI and multimodal data for educational feedback: Insights from embodied math learning. *British Journal of Educational Technology*. <https://doi.org/10.1111/bjet.13587>

Deng, R., Jiang, M., Yu, X., Lu, Y., & Liu, S. (2025). Does ChatGPT enhance student learning? A systematic review and meta-analysis of experimental studies. *Computers & Education*, 227, 105224.

<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.105224>

Dinsmore, D. L., & Fryer, L. K. (2026). What does current genAI actually mean for student learning? *Learning and Individual Differences*, 125, 102834.

<https://doi.org/10.1016/j.lindif.2025.102834>

Eedi & Google DeepMind (2025). Human-in-the-Loop AI Tutoring Outperforms Human-Only Support. Exploratory Research Report, veröffentlicht 2025.

<https://finance.yahoo.com/news/exploratory-research-eedi-google-deepmind-090000225.html>

Eti, N., Mosia, M., & Egara, F. O. (2026). The role of AI-driven personalised learning in enhancing mathematics problem-solving skills: A systematic review. *Frontiers in Computer Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2026.1813431>

Fock, A., & Siller, H.-S. (2025). Generative Artificial Intelligence in Secondary STEM Education in the Light of Human Flourishing: A Scoping Literature Review. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6923010/v1>

Gerlich, M. (2025). AI Tools in Society: Impacts on Cognitive Offloading and the Future of Critical Thinking. *Societies*, 15(1), 6. <https://doi.org/10.3390/soc15010006>

Gisiger, M. (2025, April 17). Die Rolle von Künstlicher Intelligenz im Lernen – Chancen und Risiken. *Michael Gisiger*.

<https://text.tchncs.de/gisiger/die-rolle-von-kunstlicher-intelligenz-im-lernen-chancen-und-risiken>

Gonnermann-Müller, J., Haase, J., Fackeldey, K., & Pokutta, S. (2025). FACET:

Teacher-centred LLM-based multi-agent systems – Towards personalized educational worksheets. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2508.11401>

Guerino, G., Chalco, G. C., Veloso, T. E., Oliveira, L., Penha, R. S. D., Melo, R. F., Vieira, T., Marinho, M. L. M., Macario, V., Bittencourt, I. I., Isotani, S., & Dermeval, D. (2023). Teacher-centered intelligent tutoring systems: Design considerations from Brazilian public school teachers. *Anais do XXXIV Simpósio Brasileiro de Informática na Educação*. <https://doi.org/10.5753/sbie.2023.235159>

Gulz, A., & Haake, M. (2021). No child left behind, nor singled out: Is it possible to combine adaptive instruction and inclusive pedagogy in early math software? *SN Social Sciences*, 1, 205. <https://doi.org/10.1007/s43545-021-00205-7>

Guo, J., Ma, Y., Jang, H., Li, T., Wu, J., Huang, D., Han, F., Noetel, M., Liao, K., Tang, X., & Kui, X. (2025). The impact of artificial intelligence on primary school students' motivation and engagement: A systematic review. *PsyArXiv*. https://doi.org/10.31234/osf.io/ecspn_v1

Harahap, R. (2024). The role of ChatGPT in enhancing mathematics education: A systematic review. *Annals of the Vietnam Academy of Science and Technology*, 28(2s), 511–524. <https://doi.org/10.52783/anvi.v28.2753>

Hocine, N., Moussa, M. B. O., & Ali, S. A. (2023). Posicalculia: An adaptive virtual environment for children with learning difficulties. *IEEE INISTA 2023*. <https://doi.org/10.1109/inista59065.2023.10310592>

Holmes, V. M. (2024). Designing an AI math tutor for children with dyslexia, dysgraphia, and dyscalculia. <https://doi.org/10.58445/rars.2035>

Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. (2019). *Artificial Intelligence in Education: Promise and Implications for Teaching and Learning*. Center for Curriculum Redesign.

Holmes, W., Porayska-Pomsta, K., Holstein, K., Sutherland, E., Baker, T., Shum, S., Santos, O. C., Rodrigo, M., Cukurova, M., Bittencourt, I., & Koedinger, K. (2021). Ethics of AI in Education: Towards a Community-Wide Framework. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 32, 504–526. <https://doi.org/10.1007/s40593-021-00239-1>

Holmes, W., & Tuomi, I. (2022). State of the art and practice in AI in education.

European Journal of Education, 57(4), 542–570. <https://doi.org/10.1111/ejed.12533>

Hwang, S. (2022). Examining the Effects of Artificial Intelligence on Elementary Students' Mathematics Achievement: A Meta-Analysis. *Sustainability*, 14(20), 13185. <https://doi.org/10.3390/su142013185>

Jančařík, A., Michal, J., & Novotná, J. (2023). Using AI Chatbot for Math Tutoring. *Journal of Education Culture and Society*, 14(2), 285–296. <https://doi.org/10.15503/jecs2023.2.285.296>

Kaliisa, R., Misiejuk, K., López-Pernas, S., & Saqr, M. (2025). How does artificial intelligence compare to human feedback? A meta-analysis of performance, feedback perception, and learning dispositions. *Educational Psychology*, 1–32. <https://doi.org/10.1080/01443410.2025.2553639>

Kestin, G., Miller, K., Klaes, A., Milbourne, T., & Ponti, G. (2025). AI tutoring outperforms in-class active learning: An RCT introducing a novel research-based design in an authentic educational setting. *Scientific Reports*, 15(1), 17458. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97652-6>

KirschnerED (2025, August 15). ChatGPT in Education: An Effect in Search of a Cause? <https://www.kirschnered.nl/2025/08/15/chatgpt-in-education-an-effect-in-search-of-a-cause/>

KMK (2024). *Handlungsempfehlung für die Bildungsverwaltung zum Umgang mit Künstlicher Intelligenz in schulischen Bildungsprozessen*. https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2024/2024_10_10-Handlungsempfehlung-KI.pdf

Kortenkamp, U. (2024). Wieviel Mathe braucht der Mensch? Mathematische Kernkompetenzen im Angesicht von KI. <https://doi.org/10.20378/irb-104036>

Kumar, H., Rothschild, D. M., Goldstein, D. G., & Hofman, J. M. (2023). Math Education with Large Language Models: Peril or Promise? (SSRN Scholarly Paper No. 4641653). *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4641653>

Kuo, B.-C., Bai, Z.-E., & Lin, C.-H. (2026). Developing an AI learning companion for mathematics problem solving in elementary schools. *Computers & Education*, 240, 105463. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2025.105463>

- Létourneau, A., Deslandes Martineau, M., Charland, P., Karran, J. A., Boasen, J., & Léger, P. M. (2025). A systematic review of AI-driven intelligent tutoring systems (ITS) in K-12 education. *npj Science of Learning*, 10(1), Article 29. <https://doi.org/10.1038/s41539-025-00320-7>
- Li, M. (2024). Integrating Artificial Intelligence in Primary Mathematics Education: Investigating Internal and External Influences on Teacher Adoption. *International Journal of Science and Mathematics Education*. <https://doi.org/10.1007/s10763-024-10515-w>
- Ligthart, M. E. U., de Droog, S. M., Bossema, M., Elloumi, L., Hoogland, K., Smakman, M. H. J., Hindriks, K. V., & Ben Allouch, S. (2023). Design specifications for a social robot math tutor. In G. Castellano, L. Riek, M. Cakmak, & J. Leite (Eds.), *Proceedings of the 2023 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* (pp. 321-330). ACM/IEEE. <https://doi.org/10.1145/3568162.3576957>
- Liu, B., Zhang, W., Wang, F. (2025). Can Generative Artificial Intelligence Effectively Enhance Students' Mathematics Learning Outcomes? A Meta-Analysis. *Education Sciences*, 16(1), 140. <https://doi.org/10.3390/educsci160101402512.20780>.
- Listyaningrum, P., Retnawati, H., Harun, H., & Ibda, H. (2024). Digital learning using ChatGPT in elementary school mathematics learning: A systematic literature review. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 36(3), 1701-1710. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v36.i3.pp1701-1710>
- Liu, J., Sun, D., Sun, J., Wang, J., & Yu, P. L. H. (2025). Designing a generative AI enabled learning environment for mathematics word problem solving in primary schools: Learning performance, attitudes and interaction. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 9, 100438. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2025.100438>
- Makransky, G., Shiwalia, B. M., Herlau, T., & Blurton, S. (2024). Beyond the „Wow“ factor: Using Generative AI for Increasing Generative Sense-Making. *In Review*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5622133/v1>
- Macina, J., Daheim, N., Hakimi, I., Kapur, M., Gurevych, I., & Sachan, M. (2025). MathTutorBench: A benchmark for measuring open-ended pedagogical capabilities of LLM tutors (arXiv:2502.18940). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.18940>
- Mason, J., Burton, L., & Stacey, K. (1982). *Thinking Mathematically*. Addison-Wesley.

Mott, B., Gupta, A., Glazewski, K., Ottenbreit-Leftwich, A., Hmelo-Silver, C., Scribner, A., Lee, S., & Lester, J. (2023). Fostering Upper Elementary AI Education: Iteratively Refining a Use-Modify-Create Scaffolding Progression for AI Planning. *Proceedings of the 2023 Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education V. 2*, 647. <https://doi.org/10.1145/3587103.3594170>

Ninaus, M., & Sailer, M. (2022). Closing the loop – The human role in artificial intelligence for education. *Frontiers in Psychology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.956798>

Opesemowo, O. A. G., & Adewuyi, H. O. (2024). A systematic review of artificial intelligence in mathematics education: The emergence of 4IR. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 20(7), em2478. <https://doi.org/10.29333/ejmste/14762>

Qian, K., Liu, S., Li, T., Raković, M., Li, X., Guan, R., Molenaar, I., Nawaz, S., Swiecki, Z., Yan, L., & Gašević, D. (2026). Towards reliable generative AI-driven scaffolding: Reducing hallucinations and enhancing quality in self-regulated learning support. *Computers & Education*, 240, 105448. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2025.105448>

Rosenfelder, A., Levitin, M. D., & Gilead, M. (2025). Towards social superintelligence? AI infers diverse psychological traits from text without specific training, outperforming human judges. *Computers in Human Behavior: Artificial Humans*, 6, 100228. <https://doi.org/10.1016/j.chbah.2025.100228>

Ruan, S., He, J., Ying, R., Burkle, J., Hakim, D., Wang, A., Yin, Y., Zhou, L., Xu, Q., AbuHashem, A. A., Dietz, G., Murnane, E. L., Brunskill, E., & Landay, J. A. (2020). Supporting children's math learning with feedback-augmented narrative technology. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. <https://doi.org/10.1145/3392063.3394400>

Rumbelow, M., & Coles, A. (2024). The Promise of AI Object-Recognition in Learning Mathematics: An Explorative Study of 6-Year-Old Children's Interactions with Cuisenaire Rods and the Blockplay.ai App. *Education Sciences*, 14(6), 591. <https://doi.org/10.3390/educsci14060591>

Samuelsson, J. (2023). Arithmetic fact fluency supported by artificial intelligence. *Frontiers in Education Technology*, 6(1), 13. <https://doi.org/10.22158/fet.v6n1p13>

Sayed, W. S., Noeman, A., Abdellatif, A., Abdelrazek, M., Badawy, M. G., Hamed, A. E. A., & El-Tantawy, S. (2022). AI-based adaptive personalized content presentation and exercises navigation for an effective and engaging e-learning platform. *Multimedia Tools and Applications*, 82(3), 3303–3333. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13076-8>

Schneider, R. J. (o. J.). Der Einsatz von KI zur Unterstützung bei der Unterrichtsvorbereitung: Wie lassen sich KI-generierte Übungsaufgaben für den Mathematikunterricht der Grundschule fachdidaktisch bewerten? *[Unveröffentlichtes Manuskript]*.

Son, T. (2024). Artificial intelligence in mathematics education: A systematic literature review on intelligent tutoring systems. *Journal of Educational Research in Mathematics*, 34(2), 187. <https://doi.org/10.29275/jerm.2024.34.2.187>

Song, Y., Kim, J., Liu, Z., Li, C., & Xing, W. (2024). Students' perceived roles, opportunities, and challenges of a generative AI-powered teachable agent: A case of middle school math class. *Journal of Research on Technology in Education*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/15391523.2024.2447727>

Topkaya, Y., Doğan, Y., Batdı, V., & Aydın, S. (2025). Artificial intelligence applications in primary education: A quantitatively-supported mixed-meta method study [Preprint]. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202501.2263.v1>

Vitale, A., & Dello Iacono, U. (2024). Using social robots as inclusive educational technology for mathematics learning through storytelling. *European Public & Social Innovation Review*, 9, 1–17. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-672>

Wang, D., Shan, D., Ju, R., Kao, B., Zhang, C., & Chen, G. (2025). Investigating dialogic interaction in K12 online one-on-one mathematics tutoring using AI and sequence mining techniques. *Education and Information Technologies*, 30(7), 9215–9240. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-13195-9>

Wang, J., & Fan, W. (2025). The effect of ChatGPT on students' learning performance, learning perception, and higher-order thinking: Insights from a meta-analysis. *Humanities and Social Sciences Communications*, 12(1), 1–21. <https://doi.org/10.1057/s41599-025-04787-y>

Wang, L., & Nie, Z. (2023). Research on adaptive learning in K-12 education in the

perspective of teachers' artificial intelligence literacy: Development, technology, improvement strategies. *IEEE CSTE 2023*.

<https://doi.org/10.1109/cste59648.2023.00059>

Wang, R. E., Ribeiro, A. T., Robinson, C. D., Loeb, S., & Demszky, D. (2024). Tutor CoPilot: A Human-AI Approach for Scaling Real-Time Expertise. *arXiv preprint arXiv:2410.03017*. <https://arxiv.org/abs/2410.03017>

Wezendonk, A., & Veldhuis, M. (2024). Adaptieve leersystemen en de didactische besluitvorming van basisschoolleerkrachten bij rekenen-wiskunde. *Tijdschrift voor Onderwijs en Praktijk in Statistiek*. <https://doi.org/10.54657/tops.13844>

Wu, R., & Yu, Z. (2024). Do AI chatbots improve students learning outcomes? Evidence from a meta-analysis. *British Journal of Educational Technology*, 55(1), 10-33. <https://doi.org/10.1111/bjet.13334>

Wu, X.-Y., Radloff, J., Yeter, I., Wang, L., & Chiu, T. K. F. (2025). Designing artificial intelligence chatbots for self-regulated learning from a systematic review based on Habermas's three interests. *Interactive Learning Environments*. <https://doi.org/10.1080/10494820.2025.2563086>

Yim, I. H. Y., & Su, J. (2025). Artificial intelligence literacy education in primary schools: A review. *International Journal of Technology and Design Education*. <https://doi.org/10.1007/s10798-025-09979-w>

Zheng, L., Niu, J., Zhong, L., & Gyasi, J. F. (2023). The effectiveness of artificial intelligence on learning achievement and learning perception: A meta-analysis. *Interactive Learning Environments*, 31(9), 5650-5664. <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.2015693>