

Was wirkt? Eine Literaturstudie zur Wirksamkeit von Systemeigenschaften in Mathematik-Lernumgebungen

Benjamin Paaßen, Berit Blanc und Insa Reichow¹

Abstract: Die vorliegende Literaturstudie untersucht die Lernwirksamkeit typischer Systemeigenschaften digitaler Mathematik-Lernumgebungen. Ausgehend vom Beispiel des *bettermarks*-Systems wurden folgende Systemeigenschaften betrachtet (A) Vollständigkeit der Aufgaben und Inhalte, (B) Intelligente Interaktionswerkzeuge, (C) Mikro-Adaptivität, (D) Makro-Adaptivität und als Rahmenbedingung (E) Einsatz im Klassenverbund. Durchsucht wurden Metastudien zur Wirksamkeit von digitalen Mathematik-Lernumgebungen (13), Wirkungsstudien zu populären Mathematik-Lernumgebungen (87) und Wirkungsstudien zu intelligenten Mathematik-Tutoring-Systemen allgemein (39). Die Auswertung ergab zwölf Kerneergebnisse zur Wirksamkeit der einzelnen Systemeigenschaften. Aus diesem Beitrag lassen sich Schlussfolgerungen für die Architektur wirksamer Mathematik-Lernumgebungen ziehen, insbesondere: Eine starke Einbindung der Lehrkräfte (vor allem in Makro-Adaptivität), ein Schwerpunkt auf Mikro-Adaptivität und reichhaltige Interaktionswerkzeuge sowie eine feine Auflösung von Aufgaben und Inhalten.

Keywords: Schule, Mathematik, Digitale Lernumgebungen, Intelligente Tutoring-Systeme, Wirksamkeitsforschung, Evaluationsstudien

1 Einleitung

Digitale Lernumgebungen halten verstärkt Einzug in die Schule, insbesondere seit der starken Ausdehnung des Online-Unterrichts im Rahmen der Covid-19-Pandemie [KJG20]. Beispielsweise ist *bettermarks* eine Lernumgebung für Mathematik in der Mittelstufe, die aktuell von rund 500.000 Schüler*innen genutzt wird. Bei der Gestaltung und bei der Beurteilung solcher Lernumgebungen stellt sich die Frage: Welche Eigenschaften sorgen dafür, dass eine Lernumgebung lernwirksam wird?

Einzelne Wirkungsstudien sind nicht geeignet, diese Frage zu beantworten, da sie nur wenige Systemvariationen miteinander vergleichen können. Glücklicherweise erlauben zahlreiche Metastudien [Hi20, KF16, Ma14, Pr22, RKS21, SC13, Sa21, SR17, Va11, VFE15] umfassendere Einblicke, decken jedoch jeweils nur einzelne oder wenige Systemeigenschaften ab. Die vorliegende Arbeit versucht, durch eine Zusammenschau

¹ Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, Educational Technology Lab, benjamin.paassen@dfki.de (<https://orcid.org/0000-0002-3899-2450>), berit.blanc@dfki.de, insa.reichow@dfki.de. Die Durchführung dieser Studie wurde durch die *bettermarks* GmbH finanziert. Die *bettermarks* GmbH hat der Veröffentlichung zugestimmt und war an der Planung des Studiendesigns beteiligt.

von Metastudien und Einzelstudien ein umfassenderes Verständnis über die Wirkung von Kern-Systemeigenschaften digitaler Mathematik-Lernumgebungen zu erhalten und daraus Empfehlungen für die Gestaltung solcher Plattformen abzuleiten.

Dieser Beitrag fokussiert vier Kerneigenschaften digitaler Mathematik-Lernumgebungen und eine Rahmenbedingung, nämlich (A) Vollständigkeit der Aufgaben und Inhalte, (B) Intelligente Interaktionswerkzeuge, (C) Mikro-Adaptivität, (D) Makro-Adaptivität und als Rahmenbedingung (E) Einsatz im Klassenverbund. Diese Liste von Eigenschaften und Rahmenbedingungen folgt beispielhaft der Beschreibung des *bettermarks*-Systems [Sp23], lässt sich aber auch auf zahlreiche andere digitale Lernumgebungen anwenden. Insbesondere entsprechen Mikro- bzw. Makro-Adaptivität etwa dem *inner* bzw. *outer loop* intelligenter Tutoring-Systeme [Va06]. Die Vollständigkeit der Inhalte, die Interaktionswerkzeuge und die Adaptivität wiederum decken im Wesentlichen das Domänenmodell, das User Interface und das pädagogische Modell der klassischen Strukturbeschreibung intelligenter Tutoring-Systeme ab [So13].

Der konkrete Mehrwert dieser Arbeit im Vergleich zu Vorarbeiten ist 1) die Synthese vorangegangener Metastudien zu einem Gesamtbild, 2) die Prüfung der Wirksamkeit anhand typischer Kerneigenschaften und Rahmenbedingungen digitaler Mathematik-Lernumgebungen und 3) die Ableitung von Gestaltungsempfehlungen.

Der Rest des Beitrags ist wie folgt strukturiert: 2) Erläuterung der Methode, also des Aufbaus der systemgeleiteten Literaturstudie, 3) Darstellung der Ergebnisse, 4) Diskussion der Ergebnisse mit Gestaltungsempfehlungen, 5) Fazit mit Erörterung von Limitationen und verbleibenden Forschungslücken.

2 Systemgeleitetes Forschungsdesign

2.1 Zentrale Systemeigenschaften und abgeleitete Forschungsfragen

Kerneigenschaft A) Vollständigkeit der Aufgaben & Inhalte

Eine wesentliche Funktion von adaptiven Mathe-Lernumgebungen generell (und *bettermarks* konkret) ist, dass Aufgaben und Inhalte zu allen Themen des Mathematik-Lehrplans und in mehreren Schwierigkeitsstufen zur Verfügung stehen. So soll Lehrkräften ermöglicht werden, nicht nur den gesamten Mathe-Lernstoff mit Lernzielen und Aufgaben abzudecken, sondern auch deren Schwierigkeit an das Fertigungslevel einzelner Lernender anzupassen (Makro-Adaptivität). Aus diesem Anliegen, wurden die folgenden zwei Forschungsfragen abgeleitet:

1. Ist eine feinere Granularität von Lernzielen und Aufgaben lernwirksam?
2. Ist eine höhere Abdeckung des Curriculums lernwirksam?

Kerneigenschaft B) Intelligente Interaktionswerkzeuge

Um mathematische Aufgaben auszuführen und zu lösen, benötigt man, neben Wissen und Fähigkeiten, unterschiedliche Werkzeuge, mit denen man dieses mathematische Wissen auch anwenden kann, wie z. B. Stift, Lineal, Zirkel, Dreieck. Digitale Mathe-Lernumgebungen versuchen in unterschiedlichem Ausmaß die Vielfalt mathematikspezifischer Interaktionswerkzeuge anzubieten, von der Formeleingabe über geometrische Konstruktionen bis hin zum Zeichnen von Wahrscheinlichkeitsbäumen und freier Lösungseingabe. Ein hoher Freiheitsgrad der Werkzeuge soll die Schüler*innen zur aktiven Auseinandersetzung mit den Aufgaben motivieren, so dass sie im besten Fall ihren eigenen Lösungsweg finden. Hieraus wurden die folgenden Forschungsfragen abgeleitet:

3. Sind reichhaltige Eingabewerkzeuge (z.B. Zeichenfunktionen) lernwirksam?
4. Sind variable Aufgabentypen (z.B. verschiedene Darstellungs- und Interaktionsformen) lernwirksam?

Kerneigenschaft C) Mikro-Adaptivität

Während Mikro-Adaptivität dem „inner loop“ eines ITS entspricht [Va06], wird sie im *bettermarks*-System als adaptive Hilfestellung während einzelner Lernaktivitäten (vgl. Speroni, 2021) bezeichnet. Das Feedback geht dabei bei elaborierteren Systemen weit über die einfache Rückmeldung, ob eine Aufgabe richtig oder falsch bearbeitet wurde, hinaus. Die Feedbackstrategien reichen von der Anzeige typischer Fehler oder von Verweisen auf hilfreiche, weitere Lernressourcen über die Möglichkeit die Antwort zu korrigieren bis hin zur Anzeige der richtigen Lösung bei wiederholten Falschantworten. In der vorliegenden Studie wurde nach empirischer Evidenz für die folgenden Forschungsfragen gesucht:

5. Ist fehlerbasiertes Feedback (über reines richtig/falsch-Feedback hinaus) lernwirksam?
6. Ist die Möglichkeit zur Korrektur und Reflexion (z.B. nach dem ersten Fehlversuch) lernwirksam?
7. Ist das Anzeigen von Lösungswegen (nach dem zweiten Fehlschlag) lernwirksam?
8. Sind zusätzliche Ressourcen (wie vorgerechnete Beispiele, Glossare, et al.) lernwirksam?

D) Makro-Adaptivität

In der vorliegenden Studie wird Makro-Adaptivität als die Auswahl von Lerninhalten und -aktivitäten gemäß des individuellen Lernfortschritts definiert (siehe auch „outer loop“ [Va06]), und die Erklärung von Speroni, 2021). In *bettermarks* wird die Makro-Adaptivität einerseits durch Lehrkräfte sichergestellt, die Inhalte angepasst für einzelne

Lernende vergeben können. Das System kann aber auch automatisch Wissenslücken erkennen (wenn bestimmte Fehler wiederholt auftreten) und Übungen vorschlagen, um diese Wissenslücken zu schließen. Hierzu wurde die folgende Forschungsfrage formuliert:

9. Ist das Identifizieren von Wissenslücken sowie die gezielte Vergabe von Übungen, um diese Lücken zu schließen, lernwirksam?

Rahmenbedingungen E) Einsatz im Klassenverbund und Abdeckung des Curriculums

Eine zentrale Frage im Zusammenhang mit dem Einsatz digitaler Lerntools ist die nach dem generellen Mehrwert gegenüber traditionellem, analogem Unterricht. Die meisten digitalen Mathe-Lernumgebungen (und so auch *bettermarks*) sind auf die überwiegende Nutzung im Nachmittags-, d. h. Hausaufgabenbereich ausgelegt. In welchem Ausmaß und in welchen Einsatzszenarien – durch Lehrkraft begleiteter Einsatz, Einsatz im Klassenverbund, Nutzung in Einzel- oder Gruppenarbeit – ist ebenso Gegenstand der Analyse wie der erneute Blick auf Befunde Wirkungsevidenz bei vollständiger Abdeckung des Curriculums. Beantwortet werden sollen hierbei diese Forschungsfragen:

10. Ist die Kombination von ITS mit Lehrkräften lernwirksam (im Vergleich zu Lehrkräften ohne ITS oder ITS ohne Einbindung von Lehrkräften)?
11. Ist eine höhere Abdeckung des Curriculums lernwirksam?

2.2 Methodisches Vorgehen

Zur Beantwortung der systemgeleiteten Forschungsfragen wurde die Literaturrecherche und -analyse in drei Recherchezweigen durchgeführt: Im Recherchezweig 1 wurden Meta-Studien zur Lernwirksamkeit intelligenter Tutoring-Systeme im Mathematik-Schulunterricht, dabei insbesondere die SWK- und TUM-Studien zu intelligenten Tutoring-Systemen in Deutschland sowie die dort zitierte Literatur analysiert [Kö22, xx]. Im Recherchezweig 2 wurde die Literatur mit Hilfe von google scholar und SCOPUS nach Wirksamkeitsstudien zu den folgenden vergleichbaren ITS im Mathematik-Schulunterricht durchsucht: *ASSISTMENTS*, *Cognitive Tutor*, *Calcularis*, *ALEKS*, *DreamBox*, *IXL*, *Area9*, *Mathegym*, *Studyly* (Klett), *Diagnose und Fördern* (Cornelsen) und *Mathe digital* (Cornelsen). Der Suchstring enthielt jeweils „<Name des Systems> AND (study OR review OR meta-analysis)“. Im Recherchezweig 3 erfolgte eine SCOPUS Literaturrecherche nach dem Schema systematischer Literaturrecherche [NG20], mit festgelegten Suchtermen sowie In- und Exklusionskriterien².

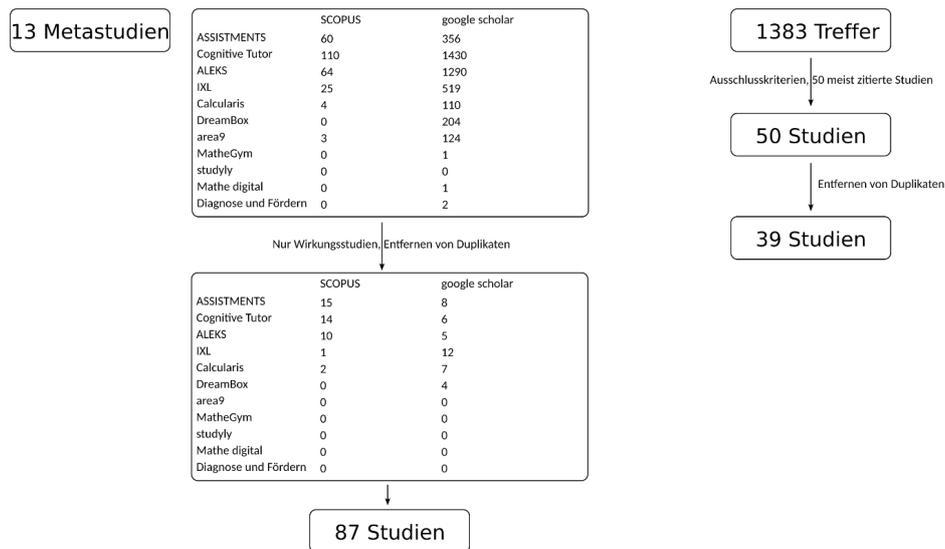
² Suchbegriffe zum Thema ITS waren z. B.: „Intelligent tutoring system“ OR „intelligent tutor“ OR ITS OR “cognitive tutor” OR “learning environment” OR “learning platform” OR “digital learning system” OR “adaptive learning system” OR “computer-assisted learning environment” OR “adaptive learning technology”. Inkludiert wurden empirische Forschungsbeiträge und Reviews zu ITS und digitalen

Abbildung 1 stellt die Fundstellen aus den einzelnen Zweigen der Recherche schematisch dar. Es wurden insgesamt 13 Metastudien aus Zweig 1 berücksichtigt, 87 Studien aus Zweig 2 und 39 Studien aus Zweig 3.

Zweig 1: Metastudien

Zweig 2: Wettbewerber

Zweig 3: SCOPUS-Literaturrecherche



3 Wirkungsevidenz zu Kern-Systemeigenschaften digitaler Mathematik-Lernumgebungen

Die nachfolgende Darstellung und Ordnung der Recherche- und Analyseergebnisse erfolgt nach den fünf unter 2.1 beschriebenen Kern-Systemeigenschaften und Rahmenbedingungen.

3.1 Kerneigenschaft A: Vollständigkeit der Aufgaben & Inhalte

@bettermarks-Team: Ein bis zwei Absätze, welche die Ergebnisse der FF A1 und A2 zusammenfassend darstellen. Siehe Umsetzung unter 3.2

A1. Eine feinere Auflösung von Lernzielen und Aufgaben führt zu höherer Lernwirksamkeit.

Lernumgebungen im Unterrichtsfach Mathematik, Klasse 5-13, welche in peer-reviewed journal articles & conference papers im Publikationszeitraum 2000-2022 erschienen sind.

A2. Eine höhere Abdeckung korreliert nicht eindeutig mit Lernwirksamkeit (ist aber zur Einbettung in den Schullalltag notwendig).

3.2 Kerneigenschaft B: Intelligente Interaktionswerkzeuge

Dem Ergebnis zur Wirkungsevidenz intelligenter Interaktionswerkzeuge ist voranzustellen, dass die gesichteten Studien nur selten genau die gleichen Eingabewerkzeuge, Darstellungs- und Interaktionsformen in ihrer Wirksamkeit untersucht und verglichen haben. Deutliche Evidenz bietet die Forschung hinsichtlich der Lernwirksamkeit reichhaltiger Eingabewerkzeuge gegenüber einfachen Formaten: Offene Eingaben, wie Texte oder Diagramme zu erstellen, sind lernförderlicher als Multiple Choice [Pr22, Ge15]. Eine einförmige Mischung aus Textaufgaben und Multiple Choice erweist sich dabei als eher ungünstig [Ma14]. Des Weiteren sind web-basierte Matheinstruktionen dann vorteilhaft, wenn sie es ermöglichen, komplizierte Fähigkeiten wie räumliche Darstellungen durch Visualisierung zu erlernen [Ra05]. Hinsichtlich der Lernwirksamkeit variabler Aufgabentypen wiesen insbesondere Aufgaben im Rahmen von Projektlernen, Problemlösungen und Modellierung und Visualisierung große Effektstärken auf – alles Lehrformen, die auf reichhaltige Darstellungs- und Interaktionsformen hindeuten, ohne dass deren Wirksamkeit im Einzelnen untersucht wurde [Be16]. Darüber hinaus sprechen mehrere Studien dafür, dass eine Instruktion im ITS dann effektiver ist, wenn sie die Schüler*innen anleitet, 1) eigene Ideen zu finden, 2) diese mit verschiedenen anderen Ideen zu vergleichen und 3) sie nach Kriterien zu sortieren, anstatt sie sofort zur richtigen Antwort zu führen [Ge15].

Nur wenige Befunde sprechen gegen den Einsatz vielfältiger Eingabemöglichkeiten und (sehr) variabler Aufgabentypen [Kö22, RKS21], weil hier kognitive Überforderung durch zu viele Handlungsoptionen vermutet wird. Insofern spricht die Evidenz insgesamt dafür, in der vorliegenden Studie wird das Fazit gezogen, dass intelligente bzw. reichhaltige Eingabewerkzeuge als Lernformat wirksamer sind als „einfache Formate“ und dass unterschiedliche Darstellungs- und Interaktionsformen bei sorgsamer Gestaltung lernwirksamer sein können.

3.3 Kerneigenschaft C: Mikro-Adaptivität

@bettermarks-Team: Ein bis zwei Absätze, welche die Ergebnisse der FF C1-C4 zusammenfassend darstellen. Siehe Umsetzung unter 3.2

C1. Fehlerbasiertes Feedback ist eher lernwirksam als einfaches Richtig/Falsch-Feedback.

C2. Die Möglichkeit zur Korrektur und Reflexion eigener Antworten ist lernwirksam.

C3. Das Anzeigen von Lösungswegen ist eher lernwirksam.

C4. Zusätzliche Ressourcen (wie vorgerechnete Beispiele, Anleitungen und Videos) sind lernwirksam.

3.4 Kerneigenschaft D: Makro-Adaptivität

@bettermarks-Team: Ein bis zwei Absätze, welche die Ergebnisse der FF D1 zusammenfassend darstellen. Siehe Umsetzung unter 3.2

D1. Das Identifizieren von Wissenslücken sowie die Vergabe gezielter Übungen, um diese Wissenslücken zu schließen, hat keinen eindeutigen Effekt.

3.5 Rahmenbedingungen E: Einsatz im Klassenverbund und Abdeckung des Curriculums

@bettermarks-Team: Ein bis zwei Absätze, welche die Ergebnisse der FF E1 und E2 zusammenfassend darstellen. Siehe Umsetzung unter 3.2

E1. Der Einsatz von ITS mit Beteiligung einer Lehrkraft ist im Vergleich zu traditionellem, nicht-digitalen Unterricht eher lernwirksam, wenn die Lehrkraft ausreichend geschult ist.

E2. Eine höhere Abdeckung eines Curriculums korreliert nicht eindeutig mit Lernwirksamkeit (siehe A3.) ist aber als Rahmenbedingung, um im deutschen Markt bestehen zu können, unabdingbar.

4 Diskussion

Folgende Empfehlungen für die Ausgestaltungen von ITS leiten wir ab:

- (A) Aufgaben und Lernziele sollten feinschrittig modelliert werden. Dies schafft die Basis für feingranulares Feedback, das zu höherer Lernwirksamkeit führt.
- (B) Inhalte sollten in abwechslungsreichen Darstellungsformen präsentiert werden und Interaktionswerkzeuge sollten reichhaltiger sein als multiple choice.
- (C) Mikro-Adaptivität sollte der Schwerpunkt des pädagogischen Designs sein. Feedback sollte über reines richtig/falsch hinausgehen und worked examples, Systemanleitungen, Links zu erklärenden Ressourcen (insbesondere Videos) und Aufforderung zur Reflexion der eigenen Aufgabenschritte einschließen. Dieses Feedback sollte adaptiv bereitgestellt werden, um Lernende nicht zu überfordern.
- (D) Makro-Adaptivität ist schwierig zu automatisieren. Existierende Systeme sind vor allem dann erfolgreich, wenn sie Kompetenzen und Fehlvorstellungen feingranular messen. Es empfiehlt sich, Lehrkräfte in makro-adaptive Entscheidungen einzubeziehen, gerade im deutschen Kontext.

- (E) Lehrkräfte sind ein Schlüssel zum Erfolg digitaler Lernumgebungen. Lehrkräfte müssen ertüchtigt werden, souverän und intuitiv mit der Lernumgebung umzugehen und es als natürlichen Teil der eigenen pädagogischen Strategie einzusetzen. Das System sollte makro-adaptive Entscheidungen der Lehrkräfte durch übersichtliche Informationen über den Lernstand der Klasse unterstützen. Um Lehrkräften den Einsatz der Umgebung im Unterrichtsalltag zu ermöglichen, muss sich der Umfang der Inhalte am Curriculum orientieren.

Wir stellen fest, dass das *bettermarks*-System diesen Empfehlungen bereits weitgehend folgt: Es modelliert Aufgabenschritte und Lernziele feinschrittig, bietet reichhaltige Interaktionswerkzeuge und Darstellungsformen, legt den Schwerpunkt auf Mikro-Adaptivität und überlässt makro-adaptive Entscheidungen vornehmlich den Lehrkräften. Das größte Ausbaupotenzial besteht bei der Unterstützung der Lehrkräfte, etwa durch ein explizites Modell des individuellen Lernstandes, durch bereitgestellte Unterrichtsinhalte und durch Empfehlungen von Inhalten.

5 Fazit

- Kurz-Wiederholung der Kernerkenntnisse aus Kapitel 3 und 4
- Limitationen der Arbeit: Nicht in allen Bereichen liegen robuste Erkenntnisse aus kausalen Vergleichsstudien vor, sondern zuweilen nur korrelative Evidenz; Studiendesigns unterscheiden sich (z.B. nach Prä-/Posttest und zusätzlichem/ersetzendem Einsatz von Lernumgebungen im Vergleich zum regulären Unterricht)
- Hauptsächliche Forschungslücken: Wie muss Makro-Adaptivität ausgestaltet sein, um wirksam zu werden? Direkte kausale Evidenz ist gesucht. Wie genau sollten Interaktionswerkzeuge ausgestaltet sein? Welche Bedeutung haben Moderatorvariablen wie Geschlecht, Nutzungsdauer und -intensität oder sozioökonomische Merkmale für die Lernwirksamkeit?

6 Literaturverzeichnis

- [Be16] Belland, B.; Walker, A.; Kim, N.; Lefler, M.: Synthesizing Results From Empirical Research on Computer-Based Scaffolding in STEM Education: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, 87(2), S. 309-344. 2016.
- [Ge15] Gerard, L.; Matuk, C.; McElhaney, K.; Linn, M.: Automated, adaptive guidance for K-12 education. *Educational Research Review*, 15, S. 41-58. 2015.
- [Hi20] Hillmayr, D.; Ziernwald, L.; Reinhold, F.; Hofer, S.; Reiss, K. M.: The potential of digital tools to enhance mathematics and science learning in secondary schools: A context-specific meta-analysis. *Computers & Education*, 153, Artikel 103897, 2020.
- [Kö22] Köller, O.; Thiel, F.; Akeren, I.; Anders, Y.; Becker-Mrotzek, M.; Cress, U.; Diehl, C.; Kleickmann, T.; Lütje-Klose, B.; Prediger, S.; Seeber, S.; Ziegler, B.; Kuper, H.; Stanat, P.; Maaz, K.; Lewalter, D.: Digitalisierung im Bildungssystem: Handlungsempfehlungen von der Kita bis zur Hochschule. Gutachten der Ständigen Wissenschaftlichen Kommission der Kultusministerkonferenz (SWK). 2022.
- [KF14] Kulik, J.; Fletcher, J.D.: Effectiveness of Intelligent Tutoring Systems: A Meta-Analytic Review. *Review of Educational Research*, 86/1, S. 42-78, 2014.
- [Ma14] Ma, W.; Adesope, O.; Nesbit, J.; Liu, Q.: Intelligent tutoring systems and learning outcomes: A meta-analysis. *Journal of Educational Psychology*, 106/4, S. 901–91, 2014.
- [NG20] Newman, M. & Gough, D.: Systematic Reviews in Educational Research: Methodology, Perspectives and Application. In O. Zawacki-Richter, M. Kerres, S. Bedenlier, M. Bond & K. Buntins (Hrsg.), *Systematic Reviews in Educational Research* (S. 3–22). 2020.
- [Pr22] Prihar, E.; Syed, M.; Ostrow, K.; Shaw, S.; Sales, A.; Heffernan, N.: Exploring Common Trends in Online Educational Experiments. In: Cristea, A.; Brown, C.; Mitrovic, A.; Bosch, N. (Hg.): *Proc. Int. Conf. on Educational Data Mining*, 2022.
- [Ra05] Rafi, A.; Anuar, K.; Samad, A.; Hayati, M., & Mahadzir, M.: Improving spatial ability using a web-based virtual environment (WbVE). *Automation in Construction*, 14(6), S. 707–715. 2005.
- [RKS21] Ran, H.; Kim, N. J.; Secada, W. G.: A meta-analysis on the effects of technology's functions and roles on students' mathematics achievement in K-12 classrooms. *Journal of Computer Assisted Learning*, 38(1), S. 258– 284, 2021.
- [SC13] Steenbergen-Hu, S.; Cooper, H.: A meta-analysis of the effectiveness of intelligent tutoring systems on K–12 students' mathematical learning. *Journal of Educational Psychology*, 105(4), S. 970–987, 2013.
- [SM21] Spitzer, M.; Musslick, S.: Academic performance of K-12 students in an online-learning environment for mathematics increased during the shutdown of schools in wake of the COVID-19 pandemic. *PLOS ONE*, 2021.

- [Sa21] Sahni, D.; Polanin, J.; Zhang, Q.; Michaelson, L.; Caverly, S.; Polese, M.; Yang, J.: A What Works Clearinghouse Rapid Evidence Review of Distance Learning Programs. Forschungsbericht. Insittute of Education Sciences, U.S. Department of Education, Washington, DC, USA, 2021.
- [So13] Sottolare, R.; Graesser, A.; Hu, X.; Holden, H.: Design recommendations for intelligent tutoring systems: Volume 1 – learner modelling. US Army Research Laboratory, Orlando, FL, USA.
- [Sp23] Aus Fehlern lernen – Das Konzept hinter bettermarks. <https://de.bettermarks.com/konzept-bettermarks/> abgerufen am 24.02.2023
- [SR17] Shute, V.; Rahimi, S.: Review of computer-based assessment for learning in elementary and secondary education. *Journal of Computer Assisted Learning*, 33(1), S. 1-19, 2017.
- [TG22] Thurm, D.; Graewert, L.: *Digitale Mathematik-Lernplattformen in Deutschland*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, Deutschland, 2022.
- [Va06] VanLehn, K.: The Behavior of Tutoring Systems. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 16(3), S. 227-265, 2006.
- [Va11] VanLehn, K.: The Relative Effectiveness of Human Tutoring, Intelligent Tutoring Systems, and Other Tutoring Systems. *Educational Psychologist*, 46(4), S. 197-221.
- [VFE15] Van der Kleij, F.; Feskens, R.; Eggen, T.: Effects of Feedback in a Computer-Based Learning Environment on Students' Learning Outcomes: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, 85(4), S. 475-511, 2015.