

Feedback im Kontext digitalen Übens mathematischer Inhalte am Beispiel der Bruchrechnung – Über die Wahrnehmung und Nutzung des Feedbacks einer Lernplattform sowie deren Einfluss auf den Lernerfolg von Siebtklässler*innen

Von der Fakultät Bildung
der Leuphana Universität Lüneburg zur Erlangung des Grades

Doktorin der Philosophie
Dr. phil.

genehmigte Dissertation von
Larissa Altenburger

geboren am 04.09.1995 in Mölln

Eingereicht am: 29.05.2024

Mündliche Verteidigung (Disputation) am: 09.12.2024

Erstbetreuer: Prof. Dr. Michael Besser, Leuphana Universität Lüneburg
Erstgutachter: Prof. Dr. Michael Besser, Leuphana Universität Lüneburg
Zweitgutachterin: Prof. Dr. Katrin Rakoczy, Justus-Liebig-Universität Gießen
Drittgutachter: Prof. Dr. Ulrich Kortenkamp, Universität Potsdam

Als Dissertation eingereicht unter dem Titel: Feedback im Kontext digitalen Übens mathematischer Inhalte am Beispiel der Bruch-rechnung – Über die Wahrnehmung und Nutzung des Feedbacks einer Lernplattform sowie deren Einfluss auf den Lernerfolg von Siebtklässler*innen

Druckjahr: 2025

Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Michael Besser und seinen Vorfahren für den tollen Nachnamen bedanken, denn ohne euch könnte ich diese Arbeit nicht frei nach dem Motto „Besser wird’s nicht!“ abgeben.

Lieber Michael, hier ein paar Worte direkt an dich: Ohne dich hätte ich mich in den letzten knapp vier Jahren persönlich und fachlich nicht zu dem Menschen entwickeln können, der ich jetzt bin. Du hast mich zu Beginn der Projektlaufzeit an die Hand genommen, um mir später den nötigen Entscheidungsfreiraum zu geben. Trotzdem hast du es immer geschafft, mich im „Wissenschaftsdschungel“ wieder einzufangen. Dabei blicke ich auf viele schöne Erinnerungen zurück. Niemals hätte ich nach meinem ersten Seminar als Bachelorstudentin bei dir damit gerechnet, dass wir irgendwann per Du sind und uns in Griechenland Witze über Elefanten im Kühlschrank erzählen. Mir bleibt nichts, außer noch einmal Danke zu sagen!

Ebenso danke ich meiner Zweitgutachterin Prof. Dr. Katrin Rakoczy und meinem Drittgutachter Prof. Dr. Ulrich Kortenkamp. Ihr habt mir beide unmittelbar das Gefühl gegeben, mit meinem Vorhaben auf dem richtigen Weg zu sein und mir dadurch sehr viel Druck genommen. Auch an euch noch einmal ein großes Dankeschön!

An meine Familie: Trotz der manchmal etwas unkonventionellen Fragen von meinem Vater (hier ein exemplarisches Beispiel, wenn ich mich wieder meiner Arbeit widmen wollte: „Hast du noch Hausaufgaben zu erledigen?“) und der Erklärungsnot meiner Mutter, habe ich mich durch euch immer unterstützt gefühlt. Ein besonderer Dank geht auch an meinen Bruder und meine Schwägerin. Ihr habt mich, ohne zu zögern und ohne zeitliche Befristung – euer Fehler – aufgenommen und mir nur in den seltensten Momenten eure Panik gezeigt, dass ich für immer bleiben könnte.

Danken möchte ich auch allen teilnehmenden Schulen sowie meinen studentischen Hilfskräften. Insbesondere Dominik hat mich in der Endphase meiner Promotion durch seine schlechten Witze häufiger an den Rand der Verzweiflung gebracht, meist so sehr, dass ich den Stress der Arbeit vergessen habe. In diesem Zuge möchte ich mich auch bei dem gesamten IMD bedanken. Ohne Euch – und die Mensgänge – hätte der Stress sicherlich die Glücksmomente überschattet.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei all meinen Freundinnen und Freunden bedanken, die sich der Korrektur meiner Arbeit angenommen haben. Respekt, dass ihr euch das angetan habt.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XI
Abschnitt A Einleitung	1
Abschnitt B Theorie	7
1 Bruchrechnung als Herausforderung mathematischer Lehr-Lern-Situationen und ein möglicher Lösungsansatz	7
1.1 Herausforderungen der Bruchrechnung	8
1.1.1 Herausforderungen bezogen auf die Addition und Subtraktion von Brüchen .	10
1.1.2 Herausforderungen bezogen auf die Äquivalenz von Brüchen – Erweitern und Kürzen sowie Umwandeln von Brüchen.....	11
1.2 Ein Lösungsansatz: Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung	13
1.2.1 Zum Unterschied konzeptuellen und prozeduralen Wissens (zur Bruchrechnung).....	14
1.2.2 Konzeptuelles vs. prozedurales Wissen – Zur Relevanz der beiden Wissensfacetten	17
1.2.3 Operationalisierung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung	21
2 Bildung in einer digitalen Welt: Digitale Medien im (Fach)Unterricht	30
2.1 Begriffsdefinition	31
2.2 Zur Wirksamkeit digitaler Medien	33
2.3 Lernplattformen als eine Kategorie digitaler Medien	34
2.3.1 Begriffsdefinition und Klassifizierung	34
2.3.2 Zur Wirksamkeit digitaler Lernplattformen	38
2.3.2.1 Feedback auf digitalen Lernplattformen	40
2.3.2.2 Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens (zur Bruchrechnung) durch digitale Lernplattformen.....	42
3 Zur Frage um die Wirksamkeit von Feedback	45
3.1 Begriffsdefinition	45
3.2 Zur Wirksamkeit von Feedback und internalen Determinanten	49
3.2.1 Komplexität von Feedback.....	50
3.2.2 Feedback Zeitpunkt	56
3.3 Externale Determinanten wirksamen Feedbacks	60
3.3.1 Vorwissen der Lernenden.....	60
3.3.2 Wahrnehmung durch Feedbackempfangende	62
3.4 Zur Relevanz der Feedbacknutzung	64
3.4.1 Einflüsse auf die Feedbacknutzung – Gründe für die (fehlende) Nutzung	66

3.5	Förderung der Motivation und Emotionen als weiteres Zielkriterium erfolgreichen Lehren und Lernens.....	68
	Abschnitt C Methode	75
1	Zentrale Forschungsfragen und Wirkmodelle	75
2	Design	78
3	Stichprobe	80
4	Intervention.....	81
4.1	Bruchrechenaufgaben – potenzielle Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung.....	82
4.2	Feedbackbedingungen.....	84
4.2.1	EG 1 „KR“	84
4.2.2	EG 2 „elabo“	85
4.3	Eingesetzte Lernplattform	89
4.3.1	Erkenntnisse zur Qualität der Lernplattform.....	90
4.3.2	Klassifizierung der Lernplattform.....	92
4.4	Verwendete elektronische Geräte.....	93
5	Instrumente.....	93
5.1	Testinstrument zur Erfassung allgemeiner Hintergrundvariablen.....	94
5.2	Testinstrument zur Erfassung der allgemeinen kognitiven Fähigkeiten	96
5.3	Testinstrument zur Erfassung der Lesefähigkeiten	97
5.4	Testinstrument zur Erfassung der Bruchrechenleistung.....	98
5.5	Testinstrument zur Erfassung der Motivation und Emotionen	101
5.6	Testinstrument zur Erfassung der Wahrnehmung von Feedback.....	102
5.7	Testinstrument zur Erfassung der Feedbacknutzung sowie Feedbackpolung (positives vs. negatives Feedback).....	103
5.8	Item- und Skalenanalysen der eingesetzten Testinstrumente.....	105
5.8.1	Analysen der eingesetzten Items und Skalen	107
6	Umgang mit fehlenden Werten	109
7	Forschungsfragen, Hypothesen und Wirkmodelle.....	111
8	Auswertungsmethoden.....	116
8.1	Korrelationsanalysen.....	117
8.2	Mittelwertvergleiche zweier Gruppen.....	118
8.3	Pfadanalysen.....	118
	Abschnitt D Ergebnisse.....	123
1	Einführung.....	123
2	Deskriptive Ergebnisse und statistische Unterschiede der beiden Feedbackbedingungen	126

3	Einflüsse auf die Feedbackwahrnehmung sowie Feedbacknutzung.....	133
3.1	Erklärung der Feedbackwahrnehmung.....	134
3.2	Erklärung der Feedbacknutzung.....	144
4	Feedbackwahrnehmung und -nutzung als Einflussfaktoren auf den Lernerfolg ..	148
4.1	Feedbackwahrnehmung als Mediator.....	149
4.1.1	Einfluss der Feedbackwahrnehmung auf die Bruchrechenleistung	149
4.1.2	Einfluss der Feedbackwahrnehmung auf die Motivation und Emotionen	154
4.2	Feedbacknutzung.....	158
4.2.1	Einfluss der Feedbacknutzung auf die Bruchrechenleistung	158
4.2.2	Einfluss der Feedbacknutzung auf die Motivation und Emotionen	162
Abschnitt E Diskussion		165
1	Zentrale Ergebnisse und mögliche Erklärungen zu den Ergebnissen	165
2	Implikationen.....	175
3	Kritische Reflektion	177
4	Ausblick.....	180
Literaturverzeichnis.....		183
Anhang		204

Abkürzungsverzeichnis

DPP	<i>Drill and Practice-Programm</i>
EG	<i>Experimentalgruppe</i>
GV	<i>Grundvorstellung</i>
IKT	<i>Informations- und Kommunikationstechnologie</i>
ITS	<i>Intelligente tutorielle Systeme</i>
KC	<i>Knowledge about concepts</i>
KCR	<i>Knowledge of correct response</i>
KH	<i>Knowledge on how to proceed</i>
KM	<i>Knowledge about mistakes</i>
KMC	<i>Knowledge on meta-cognition</i>
KP	<i>Knowledge of performance</i>
KR	<i>Knowledge of result</i>
KTC	<i>Knowledge on task constraints</i>
MAR	<i>Missing at Random</i>
MCAR	<i>Missing Completely at Random</i>
MNAR	<i>Missing not at Random</i>
MTF	<i>Multiple try feedback</i>
Mzp	<i>Messzeitpunkt</i>
NNB	<i>Natural Number Bias</i>
PISA	<i>Programme for International Student Assessment</i>
VERA-8	<i>Vergleichsarbeit für Klasse 8</i>
VIF	<i>Varianzinflationsfaktor</i>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Exemplarische Aufgaben mit Bezug zur Bruchrechnung	1
Abbildung 2: Schülerlösung zu den Aufgaben „Addition mit Brüchen“	11
Abbildung 3: Erweitern und Kürzen anhand einer bildlichen Darstellung, eigene Darstellung nach Schink (2013), S. 28	12
Abbildung 4: Schülerlösung zu der Aufgabe „Kürzen von Brüchen“	13
Abbildung 5: Schülerlösung zu den Aufgaben „Erweitern und Kürzen von Brüchen“	20
Abbildung 6: Übersetzungen zwischen verschiedenen Darstellungsebenen ermöglicht durch GV, eigene Darstellung in Anlehnung an Padberg und Wartha (2017, S. 1)	23
Abbildung 7: Aufgaben „Wechsel der Bruchdarstellung“ inklusive Schülerlösung	26
Abbildung 8: Aufgabe „Darstellen von Brüchen am Zahlenstrahl" inklusive Schülerlösung	27
Abbildung 9: Beispielhafte Nutzeroberfläche und Aufgaben inklusive Feedback zweier beispielhafter Lernplattformen (A: bettermarks, B: Anton), eigene Darstellung nach bettermarks GmbH (2023) und solocode GmbH (2023)	36
Abbildung 10: Kategorisierung digitaler Lernplattformen	36
Abbildung 11: Beispielhaftes Feedback eines intelligenten tutoriellen Systems	38
Abbildung 12: Phasen des formativen Assessments, eigene Darstellung nach Veugen et al., 2021	48
Abbildung 13: Beispielhafte Aufgabe inklusive verschiedener Feedbackarten zur Unterscheidung einfachen (1-4) und elaborierten Feedbackkomponenten (5), (1) Error Flagging, (2) KCR, (3) KP, (4) KR, (5) KH (nach Narciss, 2006) bzw. Bugs/misconceptions (nach Shute, 2008)	53
Abbildung 14: Ein Angebots-Nutzungs-Modell adaptiert nach Helmke (2015) & Lipowsky (2006), alle für diese Studie relevanten Komponenten wurden hervorgehoben	66
Abbildung 15: Zentrales zu untersuchendes Wirkmodell	78
Abbildung 16: Design der experimentellen Laborstudie	78
Abbildung 17: Beispielhaftes Feedback der EG 1 „KR“	85
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Feedbackpräsentation der EG 2 „elabo“	86
Abbildung 19: Beispielhafte Aufgabe der Intervention, eigene Darstellung nach bettermarks (2022)	86
Abbildung 20: Beispielhaftes Feedback der Feedbackart KM bzw. bugs/misconceptions, eigene Darstellung nach bettermarks (2023)	86
Abbildung 21: Beispielhafte Definition als Feedbackform der eingesetzten Lernplattform, eigene Darstellung nach bettermarks (2023)	87
Abbildung 22: Beispielhafter Tipp als Feedbackform der eingesetzten Lernplattform, eigene Darstellung nach bettermarks (2023)	88
Abbildung 23: Beispielhaftes Nachschlagen als Feedbackform der eingesetzten Lernplattform, eigene Darstellung nach bettermarks (2023)	88
Abbildung 24: Beispielhafter Lösungsweg als Feedbackform der eingesetzten Lernplattform, eigene Darstellung nach bettermarks (2023)	89
Abbildung 25: Übersicht der eingesetzten Testinstrumente in Verbindung zum Studiendesign	93
Abbildung 26: Modell zum Einfluss zwei verschiedener Feedbackarten auf die Bruchrechenleistung (Mzp 2), die Motivation und Emotionen sowie die Feedbackwahrnehmung	112
Abbildung 27: Modelle zum Einfluss verschiedener unabhängiger Variablen und der Feedbackwahrnehmung als abhängige Variable	114
Abbildung 28: Modelle zum Einfluss verschiedener unabhängiger Variablen und der Feedbacknutzung als abhängige Variablen getrennt nach EG	114
Abbildung 29: Modell zur Untersuchung des mediierenden Effekts der Feedbackwahrnehmung auf die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen	115
Abbildung 30: Modelle mit der Feedbacknutzung als unabhängige Variable und der Bruchrechenleistung (Mzp 2) sowie der Motivation und Emotionen als abhängige Variable getrennt nach EG	116
Abbildung 31: Schematische Darstellung einer Mediation, eigene Darstellung adaptiert nach Kopp und Lois (2012)	121

Abbildung 32: Schematische Darstellung einer Moderation, eigene Darstellung adaptiert nach Kopp und Lois (2012)	121
Abbildung 33: Beispielhaftes Feedback der EG 1.....	131
Abbildung 34: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen der Bruchrechenleistung (= LeistGes1) und der wahrgenommenen Kompetenzunterstützung.....	140
Abbildung 35: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen der Mathematikangst (= MathAng) und der wahrgenommenen Kompetenzunterstützung.....	141
Abbildung 36: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen der Mathematikangst (= MathAng) und des wahrgenommenen Kompetenzerlebens.....	141
Abbildung 37: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen Verstehensunterstützung (= WVerstUnt) und dem prozeduralen Wissen zur Bruchrechnung.....	153
Abbildung 38: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen konstruktiven Unterstützung (=WKonstUnt) und dem prozeduralen Wissen zur Bruchrechnung.....	153
Abbildung 39: Moderierender Einfluss der Bruchrechenleistung (Mzp 1) (= Moderator) auf den Zusammenhang zwischen der Feedbacknutzungsdauer (= X) und der Bruchrechenleistung (= Y), Anmerkung: Wenn der Moderator außerhalb des Intervalls [-0.71, 8.19] liegt, ist der bedingte Effekt von X auf Y signifikant, $p < .05$	160
Abbildung 40: Moderierender Einfluss der Bruchrechenleistung (Mzp 1) (= Moderator) auf den Zusammenhang zwischen der Feedbacknutzungsdauer (= X) und dem konzeptuellen Wissen zur Bruchrechnung (Mzp 2) (= Y), Anmerkung: Wenn der Moderator außerhalb des Intervalls [-1.14, 4.18] liegt, ist der bedingte Effekt von X auf Y signifikant, $p < .05$	161
Abbildung 41: Moderierender Einfluss der Bruchrechenleistung (Mzp 1) (= Moderator) auf den Zusammenhang zwischen der Feedbacknutzungshäufigkeit (= X) und dem konzeptuellen Wissen zur Bruchrechnung (= Y), Anmerkung: Wenn der Moderator außerhalb des Intervalls [-0.63, 6.36] liegt, ist der bedingte Effekt von X auf Y signifikant, $p < .05$	161
Abbildung 42: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen dem konzeptuellen Wissen zur Bruchrechnung (= LeistKonz1) und der Bruchrechenleistung.....	237
Abbildung 43: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen der Selbstwirksamkeitserwartung bezogen auf das Fach Mathematik (= MathSwe) und der Bruchrechenleistung	237
Abbildung 44: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen dem konzeptuellem Wissen zur Bruchrechnung zu Mzp 1 (= LeistKonz1) und dem konzeptuellem Wissen zur Bruchrechnung zu Mzp 2.....	238
Abbildung 45: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen dem prozeduralem Wissen zur Bruchrechnung (= LeistProz1) und dem konzeptuellem Wissen zur Bruchrechnung.....	238
Abbildung 46: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen den Einstellungen zu digitalen Medien (= DigMedEinst) und dem prozeduralem Wissen zur Bruchrechnung.....	239
Abbildung 47: Grafische Darstellung der Interaktion zwischen der Motivation bezogen auf das Fach Mathematik und der Feedbackbedingung auf das situative Interesse.....	240
Abbildung 48: Grafische Darstellung der Interaktion zwischen dem Interesse am Fach Mathematik und der Feedbackbedingung auf das situative Interesse.....	240
Abbildung 49: Grafische Darstellung der Interaktion zwischen der Motivation bezogen auf das Fach Mathematik und der Feedbackbedingung auf die Belastung.....	241
Abbildung 50: Grafische Darstellung der Interaktion zwischen dem Interesse am Fach Mathematik und der Feedbackbedingung auf die Belastung	241

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definitionen konzeptuellen und prozeduralen Wissens, eigene Darstellung nach Schneider, 2006, S. 54	15
Tabelle 2: Voraussetzungen hinsichtlich des Verständnisses für die korrekte Darstellung von Brüchen am Zahlenstrahl, Schulz und Wartha (2021), S. 210	26
Tabelle 3: Operationalisierung des konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung nach Lenz et al. (2019, S. 8).....	28
Tabelle 4: Komponenten elaborierten Feedbacks nach Narciss (2006), S. 23	52
Tabelle 5: Feedbackkategorien geordnet nach Komplexität nach Shute (2008), S. 160.....	52
Tabelle 6: Entscheidungsfaktoren für die Nutzung von direktem und verzögertem Feedback nach Duss (2020, S. 15)	60
Tabelle 7: Ausgewählte, in der Intervention eingesetzte Aufgaben zur potenziellen Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung, eigene Darstellungen nach bettermarks (2022).....	83
Tabelle 8: Darstellender Vergleich der Merkmale von ITS und den Eigenschaften der eingesetzten Lernplattform.....	92
Tabelle 9: Übersicht der eingesetzten Testinstrumente.....	94
Tabelle 10: Testinstrument zur Erfassung allgemeiner Hintergrundvariablen (emotional-motivationale Variablen)	95
Tabelle 11: Testinstrument zur Erfassung allgemeiner Hintergrundvariablen (Variablen hinsichtlich digitaler Medien)	96
Tabelle 12: Testinstrument zur Erfassung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung nach Lenz et al. (2019), S. 11	100
Tabelle 13: Testinstrument zur Erfassung der Motivation und Emotionen.....	102
Tabelle 14: Testinstrument zur Erfassung der Feedbackwahrnehmung.....	103
Tabelle 15: Cronbachs Alpha, Trennschärfen sowie ggf. Itemschwierigkeiten der eingesetzten Skalen	108
Tabelle 16: Verzeichnis der in den Tabellen verwendeten Abkürzungen.....	124
Tabelle 17: Deskriptive Ergebnisse des Test zur Erhebung des Vorwissens zur Bruchrechnung, der allgemeinen kognitiven Fähigkeiten und der Lesefähigkeiten sowie Mittelwertsunterschiede nach EG.....	126
Tabelle 18: Deskriptive Ergebnisse der Tests zur Erhebung der Bruchrechenfähigkeit sowie Mittelwertsunterschiede nach EG.....	129
Tabelle 19: Mittelwertsunterschiede der Bruchrechenleistung nach Mzp	129
Tabelle 20: Mittelwertsunterschiede nach Mzp und EG	129
Tabelle 21: Deskriptive Ergebnisse der Tests zur Erhebung der Motivation und Emotionen und Feedbackwahrnehmung sowie Mittelwertsunterschiede nach EG	130
Tabelle 22: Deskriptive Werte der Feedbacknutzung sowie der Feedbackpolung (pos. vs. neg.) EG 2	133
Tabelle 23: Ergebnisse der Regressionsmodelle mit Interaktionseffekten zur Vorhersage der wahrgenommenen Kompetenzunterstützung und des wahrgenommenen Kompetenzerlebens .	136
Tabelle 24: Ergebnisse der Regressionsmodelle mit Interaktionseffekten zur Vorhersage der wahrgenommenen Nützlichkeit, der wahrgenommenen Verstehensunterstützung und der wahrgenommenen konstruktiven Unterstützung	138
Tabelle 25: Ergebnisse der Regressionsmodelle zur Vorhersage der Feedbackwahrnehmung für EG 2	143
Tabelle 26: Ergebnisse der Regressionsmodelle zur Vorhersage der Feedbacknutzung von EG 2 durch die Bruchrechenleistung (Mzp 1), Variablen bezogen auf digitale Medien, emotional-motivationale Variablen, die Feedbackwahrnehmung und die Feedbackpolung (pos. vs. neg.)..	146
Tabelle 27: Ergebnisse der Regressionsmodelle mit Interaktionseffekten zur Vorhersage der Bruchrechenleistung (Mzp 2)	150

Tabelle 28: Ergebnisse der Mediationsmodelle zur Vorhersage der Motivation und Emotionen.....	154
Tabelle 29: Ergebnisse der Regressionsmodelle mit Interaktionseffekten zur Vorhersage der intrinsischen Motivation, des situativen Interesses und der Belastung.....	156
Tabelle 30: Ergebnisse der Regressionsmodelle zur Vorhersage der Bruchrechenfähigkeit (Mzp 2)	159
Tabelle 31: Ergebnisse der Regressionsmodelle mit Interaktionseffekten zur Vorhersage der intrinsischen Motivation	163
Tabelle 32: Ergebnisse der Regressionsmodelle mit Interaktionseffekten zur Vorhersage des situativen Interesses und der Belastung	164
Tabelle 33: Darstellung aller Aufgaben der Intervention.....	209
Tabelle 34: Trennschärfe r_{ii} und Schwierigkeitsindex P_i aller Items zur Erfassung der Bruchrechenleistung	213
Tabelle 35: Trennschärfe r_{ii} und Schwierigkeitindex P_i Items des konzeptuellen Wissens zur Bruchrechnung.....	214
Tabelle 36: Trennschärfe r_{ii} und Schwierigkeitindex P_i des prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung	214
Tabelle 37: Trennschärfe r_{ii} und Schwierigkeitindex P_i der Skala „allgemeinen kognitiven Fähigkeiten“ (Mzp 1).....	215
Tabelle 38: Trennschärfe r_{ii} und Schwierigkeitindex P_i für die Skala „Lesefähigkeiten“	215
Tabelle 39: Trennschärfe r_{ii} der Subskala „intrinsische Motivation“	216
Tabelle 40: Trennschärfe r_{ii} der Subskala „situatives Interesse“	216
Tabelle 41: Trennschärfe r_{ii} der Subskala „Belastung“	216
Tabelle 42: Trennschärfe r_{ii} der Subskala „Kompetenzunterstützung“	217
Tabelle 43: Trennschärfe r_{ii} der Subskala „Kompetenzerleben“	217
Tabelle 44: Trennschärfe r_{ii} der Subskala „Nützlichkeit“	217
Tabelle 45: Trennschärfe r_{ii} der Subskala „Verstehensunterstützung“.....	217
Tabelle 46: Trennschärfe r_{ii} der Subskala „konstruktive Unterstützung“.....	217
Tabelle 47: Darstellung der fehlenden Werte pro Schüler*innen	218
Tabelle 48: Darstellung der fehlenden Werte pro Item	218
Tabelle 49: Test auf Normalverteilung zur Prüfung der Voraussetzung der Multiplen Imputation, $n_v =$ normalverteilt.....	220
Tabelle 50: Mittelwertsunterschiede der Bruchrechenleistung nach Mzp unter Ausschluss von elf Proband*innen	228
Tabelle 51: Mittelwertsunterschiede nach Mzp und EG unter Ausschluss von elf Proband*innen....	228
Tabelle 52: Deskriptive Ergebnisse für die Subskalen der Variablen bezogen auf digitale Medien, der motivational-emotionalen Variablen sowie der Variable „Polung des Feedbacks“	229
Tabelle 53: Rangkorrelationen nach Spearman zwischen der Bruchrechenleistung, den allgemeinen kognitiven Fähigkeiten, der Lesefähigkeit, den motivational-emotionalen Variablen, den Variablen bezogen auf digitale Medien, den Subskalen zur Feedbackwahrnehmung sowie der Polung des Feedbacks.....	230
Tabelle 54: Punktbiseriale Korrelationen zwischen der Feedbacknutzung der EG 1 und den Variablen zur Feedbackwahrnehmung, den Leistungsvariablen zu Mzp 1, den motivational-emotionalen Variablen und den Variablen bezogen auf digitale Medien.....	231
Tabelle 55: Rangkorrelationen nach Spearman zwischen den Feedbacknutzungsindikatoren, EG 2.	231
Tabelle 56: Rangkorrelationen nach Spearman zwischen der Feedbacknutzungsdauer und den Variablen zur Feedbackwahrnehmung, den Leistungsvariablen zu Mzp 1, Variablen bezogen auf digitale Medien und motivational-emotionale Variablen, EG 2	232
Tabelle 57: Rangkorrelationen nach Spearman zwischen Feedbacknutzungshäufigkeit und den Variablen zur Feedbackwahrnehmung, den Leistungsvariablen zu Mzp 1, Variablen bezogen auf digitale Medien und motivational-emotionale Variablen, EG 2	233
Tabelle 58: Rangkorrelationen nach Spearman zwischen den Feedbackwahrnehmungsvariablen und den Bruchrechenfähigkeitsdimensionen (Mzp 2).....	234

Tabelle 59: Produkt-Moment- Korrelationen nach Pearson zwischen den Subskalen zur Feedbackwahrnehmung und den Subskalen zur Motivation und Emotion.....	234
Tabelle 60: Logistische Regressionsanalysen zur Wirkung der Feedbackwahrnehmung auf „Feedbacknutzung EG 1“	235
Tabelle 61: Logistische Regressionsanalyse zur Wirkung der „Bruchrechenleistung“ auf „Feedbacknutzung EG 1“	235
Tabelle 62: Logistische Regressionsanalyse zur Wirkung der „Variablen bezogen auf digitalen Medien“ auf „Feedbacknutzung EG 1“	236
Tabelle 63: Logistische Regressionsanalyse zur Wirkung der motivational-emotionalen Variablen auf „Feedbacknutzung EG 1“	236

Abschnitt A Einleitung

Rosa sagt: „ $\frac{3}{7}$ ist größer als $\frac{3}{5}$, weil 7 größer als 5 ist.“
Erkläre, warum sie nicht recht hat. (Lenz et al., 2019)

Max hat die Schinkenpizza in vier gleich große Stücke geschnitten. Sarah isst 3 Stücke.
Welchen Teil der Pizza hat sie insgesamt gegessen?

Die Tombola beim Schulfest hat 1236 Euro Einnahmen erbracht. $\frac{3}{4}$ hiervon werden an
ein Kinderdorf überwiesen.
Wie viel Euro erhält das Kinderdorf? (Mathematik heute 6, S. 43 zitiert in Padberg &
Wartha, 2017)

Schuldig oder nicht schuldig?
Oft wird ein Urteil gesprochen, bei dem nicht eindeutig der Beklagte oder der Kläger
schuldig ist. Beide haben eine Teilschuld und müssen gemeinsam die Kosten des
Gerichtsverfahrens tragen.
„Die Kosten des Verfahrens trägt zu drei Teilen der Beklagte zu einem Teil der Kläger.“
Welchen Bruchteil der Gerichtskosten müssen Kläger und Beklagter in diesem Fall
bezahlen? (Mathematik Neue Wege 5, S. 232 zitiert in Padberg & Wartha, 2017)

Abbildung 1: Exemplarische Aufgaben mit Bezug zur Bruchrechnung

Alle in Abbildung 1 genannten Aufgaben haben eine Sache gemeinsam: Für die korrekte Bearbeitung werden Fähigkeiten zum Umgang mit Bruchzahlen¹ benötigt. Die Bruchrechnung ist ein fundamentales Konzept in der Mathematik, das sich mit der Darstellung und Manipulation von Brüchen befasst. Die Aufgaben zeigen exemplarisch, dass es sich bei der Bruchrechnung um ein alltägliches und zugleich herausforderndes Gebiet der Mathematik handelt, welches seit Jahrhunderten Forscher*innen, Didaktiker*innen, Lehrkräfte sowie Schüler*innen gleichermaßen vor Schwierigkeiten stellt (Lenz et al., 2019a; Lortie-Forgues et al., 2015; Obersteiner & Tumpek, 2015; Winter, 1999). Da wir in verschiedenen Alltagssituationen mit Brüchen konfrontiert werden, scheint eine schulische Bildung hinsichtlich des korrekten Umgangs mit

¹ Vorab soll angemerkt werden, dass sich der Definition nach Reinhold (2019) zu Brüchen und Bruchzahlen angeschlossen wird: „[...] die Begriffe *Bruch* und *Bruchzahl* [werden] synonym für die Darstellung einer positiven rationalen Zahl in Bruchschreibweise verwendet. Insbesondere sind damit nicht reelle Zahlen in Bruchschreibweise – etwa $\frac{\pi}{2}$ oder $\frac{1}{\sqrt{2}}$ – gemeint“ (S. 34). Auch wenn die Repräsentation von Brüchen auf vielfältige Weise geschehen kann (Padberg & Wartha, 2017), beschränkt sich die Studie – und damit auch nachfolgende Ausführungen – auf gemeine Brüche. Dezimalbruchschreibweisen (also die „typische Komma-Schreibweise“, z. B. 1,56) finden demnach keine Berücksichtigung. Auf eine formale Definition der rationalen Zahlen, von denen Bruchzahlen einen Teil darstellen, wird an dieser Stelle verzichtet – es soll lediglich auf die Ausführungen von Goebbels und Ritter (2011) hingewiesen werden.

Bruchzahlen unumgänglich, wie auch ein Blick in das Kerncurriculum Niedersachsens (Niedersächsisches Kultusministerium, 2021) oder in die Fachanforderungen Schleswig-Holsteins (Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein, 2014) zeigt. Dabei gilt: Beherrschen Lernende die Bruchrechnung, ist die Wahrscheinlichkeit für weiteren Erfolg im Fach Mathematik sowie im späteren Berufsalltag umso höher. Bruchzahlen ermöglichen es präzise und effektive Berechnungen durchzuführen, insbesondere wenn mit Teilen von Ganzen – wobei Bruchzahlen durchaus mehr als „Teile eines echten Ganzen“ umfassen – gearbeitet wird. Dadurch gilt die Bruchrechnung als unverzichtbares Werkzeug verschiedener mathematischer Disziplinen wie Algebra und Analysis. Erst durch die Bruchrechnung wird es möglich, komplexe Probleme wie beispielsweise das Berechnen von Wahrscheinlichkeiten zu lösen (Bailey et al., 2012; Booth & Newton, 2012; Padberg & Wartha, 2017; Lortie-Forgues et al., 2015; Siegler et al., 2012). Doch trotz ihrer Bedeutung und Vielseitigkeit bereitet die Bruchrechnung vielen Menschen große Probleme und gilt als große Herausforderung im Übergang von den natürlichen zu den rationalen Zahlen. Die Bruchrechnung gilt trotz vielfältiger Bemühungen bildungspolitischer Akteur*innen als anspruchsvoller und schwer zu erlernender Themenbereich des Mathematikunterrichts (Lenz et al., 2019a; Lortie-Forgues et al., 2015; Obersteiner & Tumpek, 2015; Winter, 1999).

Mit den Herausforderungen der Bruchrechnung geht eine elementare Frage einher: Was kann getan werden, um die Bruchrechenleistung von Lernenden effektiv zu fördern? Ein Lösungsansatz konzentriert sich auf die Idee der gezielten Förderung von konzeptuellem als auch prozeduralem Wissen zur Bruchrechnung (Cramer et al., 2002; Gabriel et al., 2013; Hecht & Vagi, 2010; Siegler & Lortie-Forgues, 2015). Konzeptuelles und prozedurales Wissen sind zwei Wissensfacetten, die eng miteinander verbunden sind, aber dennoch unterschiedliche definitorische Aspekte implizieren (Rittle-Johnson et al., 2001). Konzeptuelles Wissen bezieht sich auf das Verständnis von Konzepten, Prinzipien und Zusammenhängen und steht in einem engen Verhältnis zu Grundvorstellungen, während prozedurales Wissen sich auf die Fähigkeit bezieht, bestimmte Handlungen, Verfahren oder Operationen durchzuführen (z. B. Haapsalo & Kadjevich, 2000; Rittle-Johnson et al., 2001). Beide Wissensfacetten nehmen für einen erfolgreichen Umgang mit Bruchzahlen eine entscheidende Rolle ein. Konzeptuelles Wissen ermöglicht es den Lernenden, übertragbare Prinzipien und Ideen zu verstehen und dadurch Lernen nachhaltig zu gestalten (Hasemann, 1981; Malle, 2004; Padberg & Wartha, 2017; Rittle-Johnson et al., 2001; vom Hofe, 1995), während prozedurales Wissen Lernenden die Fähigkeit verleiht, spezifische Aufgaben und Probleme zu bewältigen und eine kognitive Entlastung durch das

Erlernen von Algorithmen zu schaffen (Heymann, 2005; Lerche, 2019; Schneider & Stern, 2010).

Wie aber lässt sich konzeptuelles und prozedurales Wissen zur Bruchrechnung fördern? Lehr-Lern-Prozesse hinsichtlich der Ausbildung konzeptuellen als auch prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung zu verbessern, gilt als ein zentrales Ziel empirischer Bildungsforschung. Um Herausforderungen schulischen Lernens zu begegnen, wird immer wieder das Potenzial digitaler Medien diskutiert (Cheung & Slavin, 2013; Ellington, 2003; Hattie, 2009; Hillmayr et al., 2020; Li & Ma, 2010; Sanders et al., 2019; Steenbergen-Hu & Cooper, 2014). In den letzten Jahrzehnten hat sich die Art und Weise, wie in Schule gelernt und Wissen vermittelt wird unter anderem durch den Einzug digitaler Medien verändert. Befördert wird die Digitalisierung von Schule durch verschiedene bildungspolitische Maßnahmen (z. B. Die Bundesregierung, 2014; Kultusministerkonferenz, 2017). Besonders durch die pandemiebedingten zeitweisen Schulschließungen wurden immer mehr Lernplattformen in Lehr-Lern-Prozesse integriert, um das Distanzlernen zu vereinfachen. Wissenschaftler*innen und Didaktiker*innen betonen dabei immer wieder, dass die Digitalisierung von Schule wichtig sei, allerdings unter didaktischer Reflexion geschehen sollte und nicht aufgrund eines reinen „Digitalisierungswillens“ (Fischer, 2017). Es stellen sich daher die Fragen, inwiefern Unterrichtsprozesse, wie das Lehren und Erlernen der Bruchrechnung durch digitale Lernplattformen unterstützt werden können und welche Chancen und Herausforderungen sich aus dem Einsatz digitaler Lernplattformen im Klassenzimmer ergeben.

Besonders das von den Lernplattformen bereitgestellte Feedback bietet Anschluss an die Diskussion hinsichtlich der Frage, ob durch digitale Lernplattformen herausfordernde Themen wie der Bruchrechnung begegnet werden kann. Denn Feedback hat sich bei passender Umsetzung als einer der lernförderlichsten Faktoren herausgestellt (z. B. Azevedo & Bernard, 1995; Hattie, 2009; Mertens et al., 2022; Wisniewski et al., 2019) und steht darüber hinaus im Zusammenhang mit motivationalen und emotionalen Variablen (Finn & Zimmer, 2012; Henderlong & Lepper, 2002; Kuklick & Lindner, 2023), die es neben der Leistung von Lernenden ebenfalls zu fördern gilt.

Zur Verdeutlichung der Relevanz von Feedback sollen in einem kurzen Gedankenexperiment erneut die Bruchrechenaufgaben aus Abbildung 1 betrachtet werden. Versuchen Sie als Leser*in sich in die Situation eines*r Schüler*in hineinzusetzen und die Aufgaben zu lösen. Sind Sie sich Ihrer Antworten ganz sicher? Wie fühlen Sie sich mit der Tatsache, dass Sie zu keinem Zeitpunkt dieser Arbeit über die korrekte Lösung informiert werden? Es scheint ein

natürliches Bedürfnis des menschlichen Wesens zu sein, Antworten zu finden und diese zu überprüfen. Können wir eine Antwort nicht überprüfen, kann dies schnell zu Frustration führen. Wenn wir also nicht eigenständig zu einer Lösung finden oder diese nicht abgleichen können, sind wir auf externes Feedback angewiesen. Feedback spielt für das Individuum und den Lernprozess von Schüler*innen demnach eine entscheidende Rolle. Es dient dazu, den Lernenden Informationen über ihren aktuellen Leistungsstand zu geben, sie bei der Reflektion ihres Lernens zu unterstützen und konkrete Hinweise zur Schließung der Lücke zwischen aktuellem Leistungsstand und Zielzustand zu liefern (Ramaprasad, 1983; Sadler, 1989). Zahlreiche Studien belegen die positive Wirkung von Feedback auf die Leistung sowie die Motivation und Emotionen von Lernenden (z. B. Azevedo & Bernard, 1995; Hattie, 2009; Mertens et al., 2022; Wisniewski et al., 2019). Dabei stellt sich jedoch die Heterogenität der Studienergebnisse als problematisch heraus. Es bedarf also weiterer Forschung, wann Feedback tatsächlich den Lernerfolg steigert. Innerhalb der Feedbackforschung wurde die Sicht der Lernenden lange Zeit vernachlässigt. Prozesse wie die Verarbeitung und Wahrnehmung sowie Nutzung von Feedback fanden kaum Berücksichtigung in empirischer Forschung (Lui & Andrade, 2022).

Ausgehend von den Herausforderungen der Bruchrechnung und vor dem Hintergrund der stetigen Entwicklung von Lehr-Lern-Prozessen sowie dem Desiderat genauer zu untersuchen, wann Feedback lernwirksam erscheint und welche Rolle die Wahrnehmung und Nutzung von Feedback spielt, sollen die nachfolgenden Forschungsfragen (für genauere Ausführungen vgl. Abschnitt C, Kapitel 1) untersucht werden:

Forschungsfrage 1: (Inwiefern) Unterscheiden sich die Bruchrechenleistung, die Motivation und Emotionen sowie die Feedbackwahrnehmung von Lernenden aufgrund unterschiedlich gestalteten Feedback?

Forschungsfrage 2: (Inwiefern) Haben Lernenden- und Feedbackereigenschaften einen Einfluss auf die Feedbackwahrnehmung sowie Feedbacknutzung von Lernenden?

Forschungsfrage 3: Mediiert die Feedbackwahrnehmung den Effekt von Feedback auf die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen von Lernenden?

Forschungsfrage 4: (Inwiefern) Beeinflusst die Feedbacknutzung die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen von Lernenden?

Zur theoretischen und empirischen Auseinandersetzung mit den Forschungsfragen wird die Arbeit nach den einleitenden Ausführungen (Abschnitt A) wie folgt gegliedert:

Abschnitt B – Theorie:

Im Rahmen der theoretischen Auseinandersetzungen wird in einem ersten Schritt das mathematische Thema der Bruchrechnung und insbesondere die damit einhergehenden Herausforderungen für den Lehr-Lern-Prozess aufgegriffen (Kapitel 1.1). Zur Begegnung der Schwierigkeiten bezüglich der Bruchrechnung werden die Facetten des konzeptuellen und prozeduralen Wissens aufgearbeitet und konzeptionelle Grundlagen gelegt (Kapitel 1.2). Aufbauend darauf werden die Entwicklung von Unterricht hinsichtlich der Digitalisierung schulischer Prozesse und damit einhergehende Potenziale und Grenzen digitaler Medien im Allgemeinen und digitaler Lernplattformen im Speziellen thematisiert (Kapitel 2). Um ein besonderes Potenzial digitaler Lernplattformen aufzugreifen, werden theoretische und empirische Erkenntnisse zum Thema „Feedback“ dargestellt (Kapitel 3). Hinsichtlich des Potenzials von Feedback werden insbesondere Determinanten, die die Wirksamkeit beeinflussen (können), aufgegriffen (Kapitel 3.2, Kapitel 3.3 & Kapitel 3.4). Schwerpunktmäßig wird dabei nicht nur untersucht, ob Feedback (einer digitalen Lernplattform) die Leistung von Lernenden steigern kann, sondern auch die Motivation und Emotionen (Kapitel 3.5).

Abschnitt C – Methode:

In Kapitel 1 werden die zentralen Forschungsfragen und Wirkmodelle benannt und erläutert. Daran anschließend folgen Ausführungen zum Design der Interventionsstudie mit zwei Messzeitpunkten (Kapitel 2) sowie zur Stichprobe (Kapitel 3) – es haben Siebtklässler*innen von verschiedenen Gemeinschafts- und Oberschulen, die nach dem Zufallsprinzip zwei parallelierten Experimentalgruppen zugewiesen wurden, an der Studie teilgenommen. Beide Experimentalgruppen arbeiteten im Rahmen einer Intervention an einer digitalen Lernplattform zur Förderung ihrer Bruchrechenleistung sowie der Motivation und Emotion, wobei sich das Feedback der Lernplattform wesentlich unterschied (Kapitel 4). Unter Verwendung spezifischer Testinstrumente sollte beurteilt werden, inwiefern sich die beiden Feedbackbedingungen hinsichtlich ihrer Bruchrechenleistung sowie Motivation und Emotionen, aber auch der Feedbackwahrnehmung und -nutzung unterscheiden (Kapitel 5). Mit Blick auf die anschließenden Analysen wird erläutert, wie mit fehlenden Werten umgegangen wird (Kapitel 6). Aufbauend auf den vorangegangenen Ausführungen – insbesondere zum Design der Studie und den eingesetzten Testinstrumenten – findet eine Ausdifferenzierung der Forschungsfragen und Wirkmodelle statt (Kapitel 7), um anschließend die vorgenommenen Auswertungsmethoden zu erläutern und diskutieren (Kapitel 8).

Abschnitt D – Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse orientiert sich an zentralen Ideen der Forschungsfragen. Ein erstes einleitendes Kapitel bereitet auf nachfolgende Analysen vor. In einem zweiten Kapitel werden deskriptive Ergebnisse zentraler Variablen berichtet und die Experimentalgruppen in Bezug auf eben diese Variablen statistisch miteinander verglichen. Anschließend erfolgen die Ergebnisberichte zu möglichen Einflussvariablen auf die Wahrnehmung sowie Nutzung von Feedback (Kapitel 3), um daraufhin die Relevanz der Feedbackwahrnehmung und -nutzung für den Lernerfolg (operationalisiert über die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen von Lernenden) zu analysieren (Kapitel 4). Angelehnt an diese Gliederung werden innerhalb der einzelnen Kapitel die ausdifferenzierten Forschungsfragen aufgeführt, die Auswertungsmethoden zur Beantwortung der jeweiligen Fragestellung benannt sowie die Voraussetzungen ebenjener Methoden kritisch reflektiert. Daran anschließend werden die Ergebnisse der jeweiligen Analysen präsentiert.

Abschnitt E – Diskussion:

Vorerst werden zentrale Erkenntnisse der Ergebnisanalysen zusammengefasst dargestellt, um diese anschließend in Verbindung zu den in Abschnitt B dieser Arbeit aufgearbeiteten theoretischen Vorüberlegungen in den Forschungskontext einzuordnen, zu diskutieren und mögliche Erklärungen für die Ergebnisse zu finden. Nachdem die Limitationen der Studie aufgezeigt wurden, werden potenzielle Implikationen in Lehr-Lern-Prozesse diskutiert. Als Abschluss der Arbeit wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Anschlussfragen und Forschungsideen gegeben.

Abschnitt B Theorie

Der nachfolgende Abschnitt dieser Arbeit widmet sich den theoretischen Aufarbeitungen drei großer Themenbereiche: (1) Bruchrechnung, (2) Digitalisierung von Schule und (3) Feedback. Zwecks einer besseren Orientierung wird zu Beginn eines jeden Oberkapitels ein Überblick über den nachfolgenden Inhalt zur Verfügung gestellt. Außerdem schließt ein Oberkapitel mit einer zusammenfassenden Darstellung der vorangegangenen Kapitel, die für eine erneute Auseinandersetzung mit den Inhalten explizite Verlinkungen beinhaltet. Neben den Verlinkungen bieten die Zusammenfassungen Erläuterungen zu zentralen Begriffen sowie als Vorbereitung auf die in Abschnitt C dieser Arbeit folgenden Fragestellungen und Wirkmodelle eine Übersicht über die theoretisch und empirisch diskutierten Zusammenhänge zentraler Variablen.

1 Bruchrechnung als Herausforderung mathematischer Lehr-Lern-Situationen und ein möglicher Lösungsansatz

Überblick des Kapitels

Ziel dieses Abschnitts ist zum einen die Vermittlung der konkreten Schwierigkeiten, mit denen Lernende sich beim Umgang mit Bruchzahlen konfrontiert sehen, um eine Verständnisgrundlage hinsichtlich der Frage zu schaffen, wieso die Bruchrechnung ein herausforderndes Thema darstellt (1.1). In diesem Zusammenhang werden für diese Arbeit relevante Bruchrechenoperationen und die spezifischen Herausforderungen, mit denen Lernende umgehen müssen, vorgestellt. Ein zweites Kapitel thematisiert eine Möglichkeit zum Begegnen von Schwierigkeiten beim Umgang mit Bruchzahlen und stellt diesbezüglich zentrale Konzepte des konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung vor (1.2). Dabei wird neben der Schaffung einer definitorischen Grundlage (1.2.1) insbesondere herausgearbeitet, wieso die Förderung beider Wissensfacetten für den korrekten Umgang mit Bruchzahlen von besonderer Bedeutung ist (1.2.2). Darüber hinaus wird auf die Diskussion um die Trennbarkeit konzeptuellen und prozeduralen Wissens eingegangen und Überlegungen zu Möglichkeiten der Operationalisierung beider Wissensfacetten vorgestellt, wobei der Zusammenhang konzeptuellen Wissens zur Bruchrechnung zu dem Konzept der GV herausgestellt wird (1.2.3).

Der Umgang mit Bruchzahlen steht häufig im Fokus fachdidaktischer (Behr et al., 1984; Reinhold, 2019) sowie allgemeiner (bildungs)wissenschaftlicher Forschung (DeWolf et al., 2014; Ischebeck et al., 2009; Siegler et al., 2013) und gilt damit als weit erforschtes Feld. In der praktischen Vermittlung erweist sich das Thema jedoch meist als Herausforderung für Lehrkräfte

wie für Lernende (Obersteiner & Tumpek, 2015; Winter, 1999). Gleichzeitig scheint die Bruchrechnung von besonderer Relevanz. In ihrem Buch „Didaktik der Bruchrechnung“ diskutieren Friedhelm Padberg und Sebastian Wartha (2017) die Frage, ob „die Bruchrechnung heute noch nötig [sei]“ (S. 7) und wiegen dabei Gründe für und gegen die Bruchschreibweise ab. Die Autoren kommen zu dem Fazit, dass die Bruchrechnung für das „alltägliche Leben“ benötigt wird sowie „um viele weitere Bereiche der Mathematik in der Schule [...] wirklich zu verstehen“ (S. 16). Darüber hinaus ist die Notwendigkeit des Verstehens der Bruchrechnung für weitere mathematische Bereiche (wie z. B. Algebra) empirisch belegt (Bailey et al., 2012; Booth & Newton, 2012; Siegler et al., 2012). Schüler*innen, die in der fünften Klasse über gutes Bruchrechnenwissen verfügen, schneiden im Vergleich zu Fünftklässler*innen mit schwacher Bruchrechenleistung mit einer höheren Wahrscheinlichkeit auch in der zehnten Jahrgangsstufe mit guten Leistungen im Fach Mathematik ab (Lortie-Forgues et al., 2015). Außerdem scheint das Bruchrechnenwissen als Prädiktor für akademischen, beruflichen und finanziellen Erfolg zu fungieren. Ein Grund dafür liegt in der Allgegenwärtigkeit von Bruchzahlen auch in anderen Fachbereichen wie den Naturwissenschaften, der Soziologie und Psychologie. Ein wichtiges Argument in der Diskussion um die Erweiterung des Zahlenraums um die rationalen Zahlen liegt in der Repräsentation der Menge an Zahlen und deren Eigenschaften. Lediglich mit natürlichen Zahlen, also ohne Bruchzahlen, wäre der Raum zwischen 0 und 1 nicht beschreibbar (Lortie-Forgues et al., 2015).

1.1 Herausforderungen der Bruchrechnung

Trotz der Relevanz der Bruchrechnung gilt sie aufgrund sehr hoher Misserfolgswahrscheinlichkeiten als unbeliebtes Thema sowohl bei Lehrkräften als auch Lernenden (Winter, 1999). Durch die hohe Fehleranfälligkeit, welche in verschiedenen empirischen Studien nachgewiesen worden ist, gilt die Bruchrechnung über alle Jahrgangsstufen hinweg als einer der schwierigsten Themenbereiche der Schulmathematik (Lenz et al., 2019a; Lortie-Forgues et al., 2015; Obersteiner & Tumpek, 2015; Winter, 1999). Zwar differiert die Bruchrechenleistung der Schüler*innen zwischen verschiedenen Ländern, allerdings scheinen sich die Lernenden aller Nationen mit größeren Problemen als in anderen Themenbereichen auseinandersetzen zu müssen. Aufgrund der geringen Bruchrechenleistung wird die Forschung und Umsetzung verschiedener Interventionen unter anderem im angloamerikanischen Raum stark gefördert. Trotz dessen ist eine Verbesserung der Bruchrechenleistung nicht wahrnehmbar wie Lortie-Forgues et al. (2015) in einer ihrer Studien, die zeigt, dass die Steigerung der Bruchrechenleistung zwischen den Jahren 1978 und 2014 kaum wahrnehmbar ist, schlussfolgern (Carpenter et al., 1980). Lortie-Forgues et al. (2015) schließen daraus: „Thus, after more than three decades, numerous

rounds of education reforms, hundreds if not thousands of research studies on mathematics teaching and learning, and billions of dollars spent to effect educational change, little improvement was evident in students' understanding of fraction arithmetic" (S. 204). Auch weitere Studien diskutieren die Defizite in der Bruchrechenleistung und die Heterogenität in Bezug auf die Bruchrechenleistung (Pekrun et al., 2006; Siegler & Pyke, 2013).

Aufgrund weitreichender Forschung können „typische“ Fehler der Bruchrechnung und ihre Gründe extrahiert werden. Eichelmann et al. (2012) stellen in ihrem Review 58 „typische“ Schülerfehler im Zusammenhang zur Bruchrechnung zusammen. Zu den meist diskutierten Fehlern gehören

- die Übertragung von Rechenregeln der Bruchrechnung auf andere Rechenverfahren (z. B. Anwendung der Regeln zur Addition von Brüchen auf die Multiplikation von Brüchen und andersherum) (Hart, 1989; Siegler & Pyke, 2013) sowie
- die Übertragung von Konzepten der natürlichen Zahlen auf die Bruchrechnung (Natural Number Bias [NNB]; z. B. $\frac{2}{3} + \frac{4}{5} = \frac{6}{8}$) (Ni & Zhou, 2005; Reinhold et al., 2020)

Der erste Punkt lässt sich auf eine vermeintliche Inkonsistenz der verschiedenen Rechenregeln bezüglich der Grundrechenarten zurückführen. Erklärungen dazu, wieso beispielsweise gleiche Nenner für die Subtraktion und Addition notwendig sind, allerdings nicht für die Multiplikation und Division, sind schwer verständlich. Hinzu kommt eine große Anzahl an zu erlernenden Prozeduren bezüglich des Umgangs mit Bruchzahlen (Lortie-Forgues et al., 2015).

Der NNB wird nach Ni und Zhou (2005) als „eine Tendenz von Schülerinnen und Schülern verstanden, Konzepte zu natürlichen Zahlen auf Bruchzahlen zu übergeneralisieren“ (Reinhold, 2019, S. 45). Als Grund für die Übergeneralisierung wird der nicht (vollständig) erfolgte Konzeptwechsel bei der Erweiterung der natürlichen Zahlen um die Bruchzahlen genannt (z. B. Vamvakoussi et al., 2012). Der fehlende Konzeptwechsel gilt als Kernthese der Conceptual-Change Theory. Die Conceptual-Change Theory geht von einer Neustrukturierung des Vorwissens als Grundvoraussetzung des Verständnisses neuer Lerninhalte (zur Relevanz des Verstehens vgl. Kapitel 1.2) aus. Für eine detaillierte Abhandlung der Conceptual-Change Theory, welche unter anderem eine kritische Auseinandersetzung mit der Theorie aus mathematikdidaktischer Perspektive beinhaltet, wird auf Reinhold (2019) verwiesen. Für die Einführung der Bruchzahlen bedeutet dies zu ordnen, welche Konzepte der natürlichen Zahlen auf die Bruchzahlen übertragbar sind und welche nicht. Beispielsweise ist das „einfache (Ab)Zählen“, wie es

noch für natürliche Zahlen möglich war, für Bruchzahlen nicht mehr umsetzbar (Lortie-Forgues et al., 2015).

Auch wenn ein großer Teil der Schülerschaft mit Problemen beim Umgang mit Bruchzahlen zu kämpfen hat, ist das Vorwissen ein elementarer Prädiktor für die Ausprägung dieser Probleme (Lortie-Forgues et al., 2015). Zentrale Einflussvariablen zum späteren Umgang mit Bruchzahlen sind insbesondere das Vorwissen zum Umgang mit natürlichen Zahlen (Bailey et al., 2014; Hecht & Vagi, 2010; Jordan et al., 2013) sowie das allgemeine Verständnis bezüglich Rechenoperationen, aber auch Vorstellungen zu gängigen Brüchen (wie z. B. $\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{4}$) zur Überprüfung der Sinnhaftigkeit der eigenen Ergebnisse (Byrnes & Wasik, 1991; Hecht, 1998; Hiebert & Lefevre, 1986).

Die Schwierigkeiten bezüglich des Umgangs mit Bruchzahlen können bei Lernenden bei verschiedenen Bruchrechenoperationen auftreten. Gängig ist die Trennung der folgenden Bruchrechenoperationen: (1) Größenvergleich, (2) Erweitern und Kürzen von Brüchen und (3) Grundrechenarten (Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division mit Brüchen). Besonders hinsichtlich der Addition und Subtraktion ist viel über „typische“ Schülerfehler und die Gründe für das Begehen dieser Fehler bekannt. Um die Addition und Subtraktion mit Brüchen vollumfänglich durchführen zu können, ist das Wissen um das Erweitern und Kürzen von Brüchen notwendig. Bezüglich des Erweiterns und Kürzens bleibt die Wertigkeit eines Bruchs erhalten, gleiches gilt beim Umwandeln von unechten Brüchen in echte Brüche (und andersherum). Das Umwandeln findet in der Literatur nur wenig Beachtung, ist für die Addition und Subtraktion jedoch ebenso von Relevanz und wird daher im weiteren Verlauf gemeinsam mit dem Erweitern und Kürzen genauer ausgeführt.

1.1.1 Herausforderungen bezogen auf die Addition und Subtraktion von Brüchen

Vor allem der NNB stellt eine Hürde für Lernende beim Umbruch hinsichtlich der Strategien von den natürlichen Zahlen hinzu den Bruchzahlen dar. Lernende neigen dazu, sowohl den Zähler als auch den Nenner zweier oder mehr Brüche zu addieren/subtrahieren (Schulz & Wartha, 2021). Dabei findet die Bezugsgröße besondere Beachtung. Nur wenn diese gleich ist, also der Nenner der zu addierenden/subtrahierenden Brüche äquivalent ist, kann die Rechenoperation sinnvoll durchgeführt werden (Schink, 2013). Hinsichtlich des Schwierigkeitsgrads, gemessen an der Lösungshäufigkeit in verschiedenen Studien, fällt Lernenden das Addieren und Subtrahieren von gleichnamigen Brüchen im Vergleich zu ungleichnamigen Brüchen deutlich leichter (Brown & Quinn, 2006; Eichelmann et al., 2012; Padberg, 1986). Die in Abbildung 2 dargestellte Aufgabe inklusive Schülerlösung bildet exemplarisch die Herausforderungen der

Addition von Brüchen ab. Die vorliegenden Bearbeitungen zeigen die Lösungen eines Schülers der Jahrgangsstufe 7 einer Gemeinschaftsschule. Die Lösungen aus Aufgabe a) und d) deuten auf den NNB hin, da der Schüler sowohl Zähler als auch Nenner addiert. Aus der Aufgabenbearbeitung zu b) und c) geht nicht hervor, ob der Schüler die Umwandlung der ganzen Zahlen in Brüche inkorrekt durchführt oder die Addition der Brüche zu den umgewandelten ganzen Zahlen nicht korrekt vornimmt.

Berechne:

a) $\frac{3}{8} + \frac{2}{5} = \frac{5}{13}$

b) $\frac{1}{3} + 4 = \frac{12}{3}$

c) $3 + \frac{1}{3} = \frac{10}{3}$

d) $\frac{2}{3} + \frac{5}{6} = \frac{7}{7}$

Abbildung 2: Schülerlösung zu den Aufgaben „Addition mit Brüchen“

1.1.2 Herausforderungen bezogen auf die Äquivalenz von Brüchen – Erweitern und Kürzen sowie Umwandeln von Brüchen

Erweitern und Kürzen von Brüchen:

Es gibt unendlich viele Möglichkeiten einen Bruch zu schreiben (Lortie-Forgues et al., 2015; Padberg, 1995) und dadurch gleichwertige (= äquivalente) Repräsentationen eben jenen Bruchs zu erhalten. So sind $\frac{5}{6}$ und $\frac{10}{12}$ von gleicher Größe, d. h. die beiden Brüche besitzen den gleichen Wert. Die Gleichwertigkeit wird durch die Erweiterung des Zählers und Nenners des Bruchs $\frac{5}{6}$ um den Faktor 2 auf $\frac{10}{12}$ ($\frac{5}{6} = \frac{5 \cdot 2}{6 \cdot 2} = \frac{10}{12}$) erreicht (Motzer, 2018; Padberg, 1995). Bildlich gesprochen wird die Unterteilung einer Figur (z. B. eines Rechtecks) beim Erweitern verfeinert (vgl. Abbildung 3) (Padberg, 1995). $\frac{10}{12}$ kann ebenfalls mit 2 auf $\frac{20}{24}$ erweitert werden und der so ent-

standene Bruch ist wiederum äquivalent zu den anderen beiden Brüchen $\frac{5}{6}$ und $\frac{10}{12}$. Da der Faktor, mit dem erweitert wird, durch eine beliebige Zahl ersetzt werden kann, gibt es für eine Bruchzahl unendlich viele Schreibweisen. Zwei Brüche sind äquivalent, wenn für die beiden Brüche $\frac{a}{b}$ und $\frac{c}{d}$ $ad = bc$ gilt (Voraussetzung b und $d \neq 0$) oder „[...] sie auf den gleichen Bruch gekürzt werden können“ (Motzer, 2018, S. 4) – dieser vollständig gekürzte Bruch wird als Repräsentant bezeichnet (Motzer, 2018).

Beim Kürzen werden Zähler und Nenner durch die gleiche Zahl dividiert. Als Gegenoperation zum Erweitern kann $\frac{20}{24}$ also auf $\frac{10}{12}$ oder $\frac{5}{6}$ gekürzt werden und die Gleichwertigkeit erhalten bleiben (Motzer, 2018). Es wird auch von einer Vergrößerung der Unterteilung einer Figur gesprochen (vgl. Abbildung 3) (Padberg, 1995). Zentraler Unterschied zwischen dem Erweitern und Kürzen von Brüchen ist, dass ein Bruch durch die Multiplikation des Zählers und Nenners mit einer beliebigen natürlichen Zahl unendlich oft erweitert werden kann, während Brüche nur durch gemeinsame Teiler von Zähler und Nenner – und damit nicht beliebig oft – gekürzt werden können (Padberg, 1995).

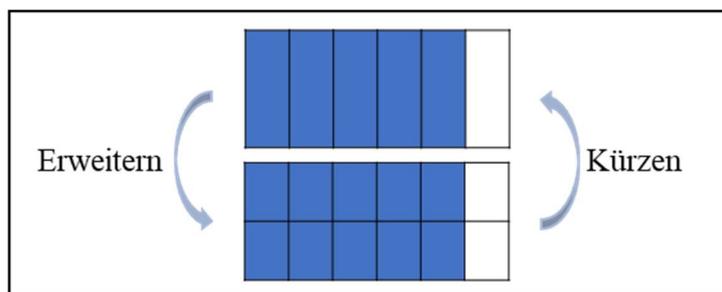
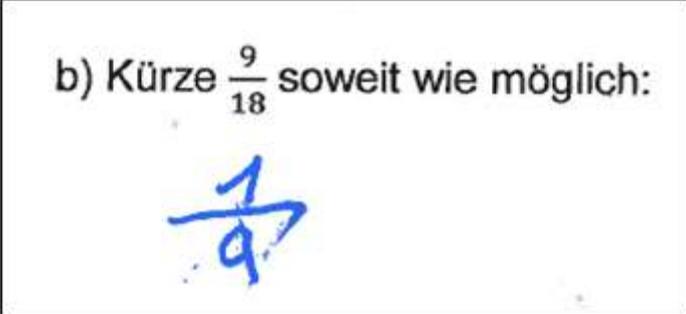


Abbildung 3: Erweitern und Kürzen anhand einer bildlichen Darstellung, eigene Darstellung nach Schink (2013), S. 28

Im Vergleich zu anderen Bruchrechenoperationen scheinen Lernende mit dem Erweitern und Kürzen von Brüchen weniger Probleme zu haben (Padberg, 1986). Aber auch hinsichtlich des Erweiterns und Kürzens von Brüchen treffen die Lernenden auf Herausforderungen. Dabei scheinen den Lernenden bestimmte Brüche mehr Schwierigkeiten zu bereiten. So wird der Bruch $\frac{9}{18}$ auffällig häufig auf $\frac{1}{9}$ oder auf $\frac{3}{6} = \frac{1}{3}$ gekürzt (Padberg, 1986). Auch die Schülerin aus Abbildung 4 zeigt diese Schwierigkeit beim Kürzen des Bruchs $\frac{9}{18}$. Padberg (1995) begründet die ungewöhnlichen Schwierigkeiten beim Kürzen des Bruchs durch die Dominanz der Zahl 9. Außerdem kommt es bei Lernenden häufiger zu dem Fehler, dass Zähler und Nenner nicht

mit der gleichen natürlichen Zahl multipliziert, sondern Zähler und Nenner mit der gleichen natürlichen Zahl addiert werden (Behr, 1984).



b) Kürze $\frac{9}{18}$ soweit wie möglich:

$\frac{1}{2}$

Abbildung 4: Schülerlösung zu der Aufgabe „Kürzen von Brüchen“

Umwandeln von Brüchen:

Als äquivalent gelten Brüche nicht nur nach dem korrekten Erweitern oder Kürzen, sondern auch, wenn die Umwandlung von einer gemischten Zahl in einen unechten Bruch oder andersherum erfolgt. Ein Bruch $\frac{a}{b}$ gilt als „unecht“, wenn $a \geq b$ (z. B. $\frac{13}{10}$; $\frac{10}{10}$). Durch die Division des Zählers durch den Nenner mit Rest kann ein unechter Bruch in eine gemischte Zahl umgewandelt werden (z. B. $\frac{13}{10} = 1\frac{3}{10}$; $\frac{10}{10} = 1$). Andersherum können gemischte Zahlen als unechte Brüche dargestellt werden. Dieses Umwandeln von unechten Brüchen in gemischte Zahlen und andersherum findet in der Literatur weniger Beachtung, stellt aber einen wichtigen Teilaspekt bezüglich des korrekten Umgangs mit Bruchzahlen dar (Padberg & Wartha, 2017). Padberg (1995) argumentiert für den Einsatz gemischter Zahlen mit einem vereinfachten Größenvergleich von Brüchen sowie zu Zwecken der Übersichtlichkeit bei der Addition und Subtraktion von Brüchen, bei denen der Zähler größer als der Nenner ist.

1.2 Ein Lösungsansatz: Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung

„Brüche haben viele Gesichter. Wer Bruchrechnung verstehen und Brüche nicht nur nach (fehleranfälligen!) Regeln handhaben will, muss diese Gesichter angeschaut und ihre Verwandtschaft erkannt haben.“ (Hefendehl-Hebeker, 1996).

„Der wahrscheinlich größte Fehler des traditionellen Mathematikunterrichts besteht darin, dass zu schnell auf eine formal-regelhafte Ebene aufgestiegen wird, bevor noch ausreichende intuitive und anschauliche Vorstellungen vom jeweiligen Stoff erworben wurden. Diesen Fehler kann man an fast allen Stoffgebieten der Schulmathematik beobachten. Die Bruchrechnung ist aber ein besonders geeignetes Studienobjekt.“ (Malle, 2004)

Vorangegangene Ausführungen legen dar, dass die Bruchrechnung ein mathematisches Feld mit vielen Herausforderungen und gleichzeitig von großer Bedeutung für den schulischen als auch außerschulischen Erfolg ist. Bezüglich der Herausforderungen fordert Hefendehl-Hebeker in ihrem Zitat neben dem Erlernen von Regeln vor allem „Gesichter und Verwandtschaften“ von Brüchen zu betrachten und damit Verstehen als primäres Ziel von Mathematikunterricht zu denken. Malle verdeutlicht, dass diese Verstehensförderung im Mathematikunterricht (an deutschen Schulen) noch zu wenig umgesetzt wird. Lehrkräfte sehen sich also der Aufgabe gegenüber, den Umgang mit Bruchzahlen nicht nur in Form von Regeln zu vermitteln, sondern Verstehen zu fördern (Petko, 2020). Verstehen wird auch als konzeptuelles Wissen (zur Bruchrechnung) bezeichnet, das Erlernen von Regeln als prozedurales Wissen (zur Bruchrechnung). Die Ursachenforschung sowie Lösungsfindungen hinsichtlich der Schwierigkeiten innerhalb der Bruchrechnung konzentrieren sich häufig auf die Trennung dieser beiden Wissensfacetten zur Bruchrechnung (z. B. Cramer et al., 2002; Gabriel et al., 2013; Hecht & Vagi, 2010; Siegler & Lortie-Forgues, 2015) und nehmen daher im Fach Mathematik und im Speziellen in der Bruchrechnung eine bedeutsame Rolle ein.

1.2.1 Zum Unterschied konzeptuellen und prozeduralen Wissens (zur Bruchrechnung)

Konzeptuelles Wissen wird im Allgemeinen als „Wissen, warum“ (Hiebert & Lefevre, 1986) und prozedurales Wissen als „Wissen, wie“ (Byrnes & Wasik, 1991) bezeichnet. Für die beiden Begrifflichkeiten existieren eine Menge an Synonymen. Sfard (1991) beispielsweise spricht von strukturellem und operationalisiertem Wissen. Für weitere synonymverwendete Bezeichnungen soll an dieser Stelle auf die Übersicht von Schneider (2006) verwiesen werden. Hinsichtlich der Definitionen von konzeptuellen und prozeduralen Wissens existieren verschiedene (prominente) Varianten. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl an diesen Definitionen.

Tabelle 1: Definitionen konzeptuellen und prozeduralen Wissens, eigene Darstellung nach Schneider, 2006, S. 54

Quelle	Konzeptuelles Wissen	Prozedurales Wissen
Rittle-Johnson et al. (2001, S. 346)	“We define conceptual knowledge as implicit or explicit understanding of the principles that govern a domain and of the interrelations between units of knowledge in a domain.“	“We define procedural knowledge as the ability to execute action sequences to solve problems. “
Haapsalo & Kadijevich (2000, S. 141)	“Conceptual knowledge denotes knowledge of and skilful ‘drive’ along particular networks , the elements of which can be concepts, rules (algorithms, procedures, etc.), and even problems [...] given in various representational forms.”	“Procedural knowledge denotes dynamic and successful utilization of particular rules, algorithms or procedures within relevant representational form(s). This usually requires not only the knowledge of the objects being utilized, but also knowledge of format and syntax for the representational system(s) expressing them.”
Rittle-Johnson & Alibali (1999, S. 175)	“We define conceptual knowledge as explicit or implicit understanding of the principles that govern a domain and of the interrelations between pieces of knowledge in a domain.”	“We define procedural knowledge as action sequences for solving problems. ”
Rittle-Johnson & Siegler (1998, S. 77)	“We define conceptual knowledge as understanding of the principles that govern the domain and of the interrelations between pieces of knowledge in a domain (although this knowledge does not need to be explicit). In the literature, this type of knowledge is also referred to as understanding or principled knowledge.”	“We define procedural knowledge as action sequences for solving problems. In the literature, this type of knowledge is sometimes referred to as skills, algorithms, or strategies. ”
Byrnes & Wasik (1991, S. 777)	“Conceptual knowledge, which consists of the core concepts for a domain and their interrelations (i.e., ‘knowing that’), has been characterized using several different constructs, including semantic nets , hierarchies, and mental models.”	“Procedural knowledge, on the other hand, is ‘knowing how’, or the knowledge of the steps required to attain various goals. Procedures have been characterized using such constructs as skills, strategies, productions, and interiorized actions. ”
Hiebert & Lefevre (1986, S. 3ff)	“Conceptual knowledge is characterized most clearly as knowledge that is rich in relationships . It can be thought of as a connected web of knowledge, a network in which the linking relationships are as prominent as the discrete pieces of information. Relationships pervade the individual facts and propositions so that all pieces of information are linked to some network. ”	“Procedural knowledge consists of rules, algorithms, or procedures used to solve mathematical tasks. A key feature of procedures is that they are executed in a predetermined linear sequence. It is the clearly sequential nature of procedures that probably sets them most apart from other forms of knowledge. [...] The procedures we are describing can be characterized as production systems (Anderson, 1983, Newell & Simon, 1972) in that they require some sort of recognizable input for firing.”

Konzeptuelles Wissen („Wissen, warum“):

Gemein haben die meisten Definitionen zum konzeptuellen Wissen die Begriffe „Zusammenhänge zwischen Wissenselementen“, „Beziehungen“ zwischen diesen Elementen und „Netzwerke“ (vgl. Tabelle 1). Konzeptuelles Wissen lässt sich also verallgemeinert als das vernetzte Wissen durch das Erkennen und Herstellen von Zusammenhängen und Strukturen als Basis von Verständnis definieren. Durch die Notwendigkeit Zusammenhänge herzustellen, um konzeptuelles Wissen zu erlangen, kann konzeptuelles Wissen also niemals als ein einzelnes Element gesehen werden, sondern besteht aus einem Netzwerk verschiedener verknüpfter Informationen (Rieß, 2018) und kann nicht durch auswendig lernen, erlangt werden (Hiebert & Lefevre, 1986). Studienergebnisse deuten darauf hin, dass konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung unter anderem durch allgemeine kognitive Fähigkeiten sowie Lesefähigkeiten beeinflusst wird (Jordan et al., 2013).

Konzeptuelles Wissen (zur Bruchrechnung) wird häufig in einem Zusammenhang mit Grundvorstellungen (GV) genannt. In der deutschsprachigen Mathematikdidaktik werden GV als „fachlich tragfähige inhaltliche Vorstellungen“ (Schink, 2013, S. 20) beschrieben. Im internationalen Sprachgebrauch wird unter anderem von (*mental*) *models* (Fischbein, 1989; Usiskin, 2008) oder *subconstructs* (Behr et al., 1992) gesprochen. Zurückzuführen ist der Grundgedanke zu den GV auf Craik (1943). Dieser definiert mentale Modelle (wie z. B. GV) als kognitive Abbildungen realer Probleme. Auf Grundlage von Craiks Überlegungen definiert Johnson-Laird (1983) mentale Modelle als im Arbeitsgedächtnis befindliche Entscheidungsmechanismen. Bezogen auf Mathematik repräsentieren GV eine individuelle mentale Vorstellung von mathematischen Inhalten (Hefendehl-Hebeker et al., 2019) oder expliziter: „Grundvorstellungen sind [mentale] Modelle, die das Übersetzen zwischen unterschiedlichen Darstellungsebenen ermöglichen [...]. Gegenstand dieser Übersetzungen sind dabei mathematische Objekte und Beziehungen“ (Schulz & Wartha, 2021, S. 10). „Verstehen“ bedeutet also das Wissen über Zusammenhänge von Symbolen, Zeichen und anderen Darstellungsformen, wie beispielsweise Bildern und die Fähigkeit der flexiblen Übersetzung zwischen Schriftlichem, Mündlichem sowie Bildern, Gegenständen und Materialien (Padberg & Wartha, 2017; Roche, 2010). Da durch GV konzeptuelles Wissen besonders geeignet erfasst werden kann, widmet sich Kapitel 1.2.3 in Ausführungen zur Operationalisierung konzeptuellen Wissens zur Bruchrechnung ausführlicher den GV.

Prozedurales Wissen („Wissen, wie“):

Prozedurales Wissen beschreibt das „Wissen, wie“ und wird laut verschiedenen Definitionen vor allem als „Handlungssequenz zur Lösung von Problemen“ beschrieben, was häufig mit Begrifflichkeiten wie „Regeln oder Algorithmen“ in Verbindung gebracht wird (vgl. Tabelle 1). Es kann also durchaus davon ausgegangen werden, dass beim Aneignen von prozeduralem Wissen das Erlernen von Handlungsabfolgen, die automatisiert werden bzw. werden können, im Fokus stehen (Lenz et al., 2019b; Schneider & Stern, 2010). Diese „Handlungsabfolgen“ sind im alltäglichen und besonders im schulischen Sprachgebrauch meist als Rechenregeln bekannt. Padberg und Wartha (2017) sprechen in diesem Zusammenhang von „etwas können“ – den Lernenden wird es demnach auf Handlungsebene ermöglicht, Bruchrechenaufgaben zu lösen. Das Wissen zur Durchführung von Bruchrechenoperationen wird demnach dem prozeduralen Wissen zur Bruchrechnung zugeschrieben (Mou et al., 2016). Für kaum ein anderes mathematisches Feld wird das Erlernen so vieler Regeln benötigt wie für die Bruchrechnung (Lortie-Forgues, 2015).

1.2.2 Konzeptuelles vs. prozedurales Wissen – Zur Relevanz der beiden Wissensfacetten

Die Vermittlung prozeduralen Wissens – als Repräsentant des Erlernens von Rechenregeln – war lange primäres Ziel, besonders in Phasen des Übens. Die Entwicklung von Unterricht führt allerdings zu einer Öffnung des Begriff des Übens hin zu einer Verstehensorientierung im Sinne des konzeptuellen Wissens. Diesbezüglich fordern Mathematikdidaktiker*innen die Schaffung von mehr Gelegenheiten, konzeptuelles Wissen aufzubauen (Lenz et al., 2019b; Padberg & Wartha, 2017; vom Hofe, 1996). So führt die Transformation von Unterricht auch die Veränderung der Bedeutung des konzeptuellen und prozeduralen Wissens parallel zur Öffnung des Übebegriffs herbei. Während Üben in den 1970er-Jahren noch als wiederholende Ausübung zur Perfektionierung von Handlungsabläufen angesehen wird, d. h. das Erlernen von Algorithmen im Sinne des prozeduralen Wissens steht im Vordergrund (z. B. Klingberg, 1974), öffnet sich im Laufe der Jahre das Verständnis von Üben. Üben im traditionellen Sinne hat zum einfachen Ziel, Wissen zu festigen und dieses schnellstmöglich abrufbar zu machen. Ursprung findet dies im Behaviorismus. Dabei ist der Unterricht immer in zwei Phasen geteilt. Phase 1 stellt die Einführung einer neuen Fertigkeit, neuen Wissens o. ä. dar und Phase 2 dient der Festigung dieser (= Üben) (Krauthausen, 2018). Neuere Ansätze kritisieren an dieser Form des Übeverständnisses, dass die „einfache“ Automatisierung zu wenig nachhaltigem Lernen führt (Leuders, 2014). Ausgehend von dieser Kritik wird Üben neu gedacht. So wird Üben von Heymann (2005) als

[...] alle eigenen Aktivitäten verstanden, die mir helfen, neu aufgenommene Informationen, neu erkannte Zusammenhänge und im Prinzip erfasste Abfolgen von Denk- und/oder Handlungsschritten auf eine Weise präsent zu machen, dass ich über sie in Situationen, in denen ich sie brauche, möglichst problemlos (sozusagen ‚automatisch‘) verfügen kann. Durch Üben werden also neu angeeignete Wissens Elemente und Prozeduren zu anwendbarem Wissen und Können verdichtet. Mit anderen Worten: Als Ergebnis des mit Übung verbundenen Lernens entwickeln sich Kompetenzen (S. 7).

Ähnlich definiert Bruder (2008) Üben für die Mathematikdidaktik und beschreibt Üben wie folgt:

Der Begriff „Üben“ umfasst in diesem Sinn alle diejenigen Lerntätigkeiten, die – alleine oder gemeinsam mit anderen ausgeführt – darauf ausgerichtet sind, neue oder schon früher kennengelernte (mathematische) Begriffe, Zusammenhänge und Verfahren sowie Vorgehensstrategien in variierenden Kontexten verfügbar zu haben und verständig verwenden zu können (S. 147).

Gegenstände des Übens im Fach Mathematik sind demnach nicht ausschließlich Fachbegriffe oder Rechenregeln, sondern ebenfalls Verknüpfungen verschiedener Inhalte und Lösungsstrategien. Dabei geht es nicht um das bloße Abspulen von Algorithmen, – wie es lange das Verständnis im traditionellen Sinne war (Krauthausen, 2018) – sondern das Verstehen von dahinter liegenden Strukturen. Durch das Üben soll Wissen in verschiedenen Kontexten – und damit flexibel – anwendbar werden.

Das neue Verständnis von Üben bringt innerhalb der Mathematikdidaktik den Begriff des „produktiven“ Übens, aus dem das „intelligente“ Üben hervorgeht, mit sich (Bruder, 2008). Sowohl das „produktive“ als auch das „intelligente“ Üben orientieren sich an denselben Grundprinzipien und sind kaum voneinander unterscheidbar, daher werden die Begriffe in diesem Beitrag als Synonyme behandelt und ab dieser Stelle ausschließlich der Begriff des „intelligenten“ Übens verwendet. Leuders (2009) definiert „intelligentes“ Üben für die Mathematikdidaktik als Festigung von Vorstellungen und das Reflektieren von Begriffen und Vorgehensweisen durch das Untersuchen von mathematischen Strukturen und das Lösen mathematischer Probleme. „Intelligent“ in diesem Sinne bedeutet die Schüler*innen zum Reflektieren anzuregen, Strukturen zu schaffen, die das Entdecken von Zusammenhängen ermöglichen und Aufgaben an alle Leistungsniveaus anzupassen. Um diesen zu begegnen, hebt das „intelligente“ Üben die Trennung zwischen dem Lernen und Üben innerhalb von Lehr-Lern-Prozessen auf, viel mehr wird Üben

als Bestandteil der Lernaktivitäten betrachtet (Bruder, 2008; Leuders, 2014; Wittmann, 1992). Dabei sind im Sinne des „intelligenten“ Übens zwei Dinge besonders wichtig: 1. Vernetzung von Neuerworbenen mit dem Vorwissen des Lernenden und 2. Anwendung des Erlernten (Bruder, 2008). Das „stumpfe Auswendiglernen“ soll demnach durch das eigenständige Gewinnen mathematischer Erkenntnisse abgelöst – oder zumindest zum Schwerpunkt des Mathematikunterrichts gemacht werden (Leuders, 2014; Wynands, 2006). Das heißt jedoch nicht, dass das Üben von Kenntnissen (z. B. die Definition des Nenners wiedergeben) und Fertigkeiten (z. B. die fehlerfreie Addition zweier Brüche) (Leuders, 2009) sowie das „Sichern von Faktenwissen und Automatisieren von Fertigkeiten“ (Leuders, 2014, S. 17) aus dem Lernprozess ausgeschlossen werden, sondern mit anderen Kompetenzfacetten (wie beispielsweise dem Fördern von Vorstellungen) verknüpft werden sollen (Leuders, 2014).

Als Konsequenz der Bildungsreform lässt sich Üben nun also vor allem das Ziel des Erkennens und Festigen von Zusammenhängen und damit die Ausbildung von Kompetenzen zuschreiben. Informationen und Handlungsabfolgen sind demnach nicht separat zu betrachten, sondern ineinander zu integrieren. Mit diesem neuen Ziel wird vor allem dem konzeptuellem Wissen größere Bedeutung beigemessen. Aber auch die Ausbildung prozeduralen Wissens bleibt weiterhin Ziel des (Mathematik)Unterrichts. Hinsichtlich der Relevanz der beiden Wissensfacetten bezüglich des Umgangs mit Bruchzahlen ziehen Reinhold et al. (2020) als ein Beispiel das Erweitern und Kürzen von Bruchzahlen heran: Die Aufgabenstellung „Erweitere $\frac{2}{3}$ mit 2“ kann mit Abrufen prozeduralen Wissens gelöst werden und bedarf keines konzeptuellen Verständnisses. Unter Verwendung bildlicher Darstellungen lässt sich jedoch die Vorstellung des Verfeinerns und Vergrößerns und damit auch konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung fördern. Diese Förderung konzeptuellen Wissens sollte frühzeitig im Lernprozess geschehen, da Studienergebnissen darauf hindeuten, dass Schüler*innen, die über einen gewissen Grad an prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung verfügen, schwerer konzeptuelles Wissen aufbauen (van Hoof et al., 2018). Außerdem stellt sich als problematisch hinsichtlich des prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung heraus, dass die bloße Anwendung von Rechenregeln, ohne diese zu verstehen, kaum flexibel (Rittle-Johnson et al., 2001) und damit sehr fehleranfällig ist (Hasemann, 1981; Malle, 2004; Padberg & Wartha, 2017) und diese Regeln ohne ein grundlegendes Verständnis schwer zu behalten sind (Brainerd & Gordon, 1994). Diesbezüglich weisen Studien darauf hin, dass Schüler*innen durchaus in der Lage sind, Rechenregeln richtig anzuwenden, die korrekte Anwendung jedoch inkonsistent erfolgt. Das heißt konkret: Bei einer Aufgabe be-

rechnen die Lernenden die Lösung korrekt, bei einer zweiten ähnlichen Aufgabe ist die Bearbeitung durch dieselben Lernenden jedoch inkorrekt. Diese Inkonsistenz führen Wissenschaftler*innen und Didaktiker*innen auf ein fehlendes Verständnis bezüglich Bruchrechenoperationen zurück (Lortie-Forgues et al., 2015), womit sich möglicherweise auch die Bearbeitungen des Schülers aus Abbildung 5 erklären lassen. Der Schüler scheint die Regeln zum Kürzen nicht konstant anwenden zu können. Dies zeigt sich durch die korrekte Bearbeitung der Teilaufgabe a) und dem inkorrekten Kürzen des Bruchs $\frac{9}{18}$ (Teilaufgabe b). Eben dieser Schüler scheitert an der Bearbeitung einer weiteren Aufgabe, bei der die bildliche Darstellung zweier äquivalenter Brüche gefordert war². Eben jene falsche Bearbeitung deutet auf ein fehlendes Verständnis hinsichtlich des Erweiterns und Kürzens von Brüchen hin und kann als ursächliche Erklärung, für die nicht konstante Anwendung von Rechenregeln gedeutet werden.

a) Kürze $\frac{6}{8}$ soweit wie möglich: $\frac{3}{4}$

b) Kürze $\frac{9}{18}$ soweit wie möglich: $\frac{4}{9}$

Abbildung 5: Schülerlösung zu den Aufgaben „Erweitern und Kürzen von Brüchen“

Zwar besteht die Forderung, konzeptuelles Wissen im Sinne eines verständnisorientierten Unterrichts besonders zu Beginn eines Lehr-Lern-Prozesses stärker als prozedurales Wissen zu fördern (Prediger, 2009; Winter, 1999), allerdings stellt die Förderung beider Wissensfacetten in Lehr-Lern-Situationen ein wichtiges Ziel von Unterricht dar, denn: GV als Repräsentanten konzeptuellen Wissens bemächtigen Lernende zwar dazu, eine Sinnhaftigkeit hinter Begriffen zu entdecken sowie auf kognitiver Ebene Verknüpfungen herzustellen (vom Hofe, 1995). Prozedurales Wissen, also das Wissen über Rechenregeln wiederum ermöglicht überhaupt erst die Umsetzung von Rechnungen durch das Wissen, wie diese Rechnungen funktionieren (Schneider & Stern, 2010). Außerdem geht die Automatisierung des Handelns mit einer kognitiven Entlastung einher und bietet die Möglichkeit, Wissen schnell präsent zu haben (Heymann, 2005; Lerche, 2019; Schneider & Stern, 2010). Im Fach Mathematik bleibt das Automatisieren

² Die genannte Aufgabe fordert die Übersetzung von Zahlzeichen in bildliche Repräsentanten und kann damit als repräsentative Aufgabe zur Erfassung konzeptuellen Wissens zum Erweitern und Kürzen von Brüchen angesehen werden.

also durchaus ein Ziel des Fachunterrichts. Lediglich das separate Erlernen konzeptuellen und prozeduralen Wissens sollte vermieden werden. Beide Wissensfacetten sind demnach von Relevanz und sollten in Lehr-Lern-Prozessen gefördert werden (Rieß, 2018), im alltäglichen Unterricht wird allerdings vor allem prozedurales Wissen zur Bruchrechnung gefördert (Brownell, 1947; Padberg & Wartha, 2017).

1.2.3 Operationalisierung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung

Um zu erfassen, ob und inwiefern konzeptuelles und prozedurales Wissen zur Bruchrechnung bei Lernenden vorhanden ist, stellt sich ausgehend von den Definitionen der beiden Wissensfacetten die Frage nach geeigneten Operationalisierungen, beispielsweise in Form von Leistungstests. Der Entwicklung von Operationalisierungen geht allerdings vorerst die Diskussion um den Zusammenhang konzeptuellen sowie prozeduralen Wissens voran. Inwiefern sich die beiden Wissensfacetten gegenseitig beeinflussen, scheint (noch) nicht abschließend geklärt. So argumentieren Wissenschaftler*innen im Allgemeinen (z. B. Marzano et al., 2000) und Mathematikdidaktiker*innen im Speziellen (z. B. Grouws & Cebulla, 2000), dass es Schüler*innen einfacher gelingt, prozedurales Wissen auszubilden, wenn sie über ein konzeptuelles Verständnis verfügen. Andere Studien wiederum fanden Belege für eine gegenseitige Beeinflussung hinsichtlich der Entwicklung konzeptuellen und prozeduralen Wissens (z. B. Rittle-Johnson et al., 2001). Aus der Diskussion hinsichtlich des Zusammenhangs konzeptuellen und prozeduralen Wissens entwickeln sich verschiedene Theorien. Concepts-first-Theorien beispielsweise gehen von einer Entwicklung des konzeptuellen Wissens vor dem prozeduralen Wissen aus (z. B. Gelman & Williams, 1998), wohingegen procedures-first-Theorien aussagen, dass prozedurales Wissen zuerst und konzeptuelles Wissen anschließend erworben wird (z. B. Siegler & Stern, 1998). Zusätzlich sagt eine weitere These, dass prozedurales und konzeptuelles Wissen vollständig unabhängig voneinander seien („inactivation view“) (z. B. Haapasalo & Kadjevich, 2000). Zwar gibt es für die eben genannten Theorien empirische Evidenzen (Schadl, 2020), der iterative Ansatz von Rittle-Johnson et al. (2001) findet momentan jedoch am meisten Anklang und deutet insbesondere für den Themenkomplex „Wissen zur Bruchrechnung“ auf eine gute Passung hin. Der iterative Ansatz geht davon aus, dass sich konzeptuelles und prozedurales Wissen in einem wechselseitigen Zusammenspiel entwickeln.

Ausgehend von dem Zusammenhang konzeptuellen und prozeduralen Wissens herrscht, besonders aufgrund widersprüchlicher Studienergebnisse, eine rege Diskussion hinsichtlich der Trennbarkeit der beiden Wissensfacetten im Bereich der Bruchrechnung. So weisen das kon-

zeptuelle und prozedurale Wissen zur Bruchrechnung von angehenden Lehrkräften in der Studie von Lin et al. (2013) keine signifikante Korrelation auf. Dieses Ergebnis steht jedoch im Widerspruch zu Studien, die positive Korrelationen zwischen dem konzeptuellen und prozeduralem Wissen im Allgemeinen fanden (Hallett et al., 2010; Jordan et al., 2013; Schneider & Stern, 2010). Studien von Hecht et al. (2003), durchgeführt mit 105 Fünftklässler*innen aus den USA sowie die Studie mit Fünft- und Sechstklässler*innen von deutschen Schulen von Schneider und Stern (2010), liefern wiederum Hinweise auf eine bessere oder ähnlich gute Passung eines 2-dimensionalen Modells im Vergleich zu einem 1-dimensionalen Modell. Auch eine aktuelle Studie von Lenz et al. (2019a) stützt den Ansatz eines 2-dimensionalen Wissensmodells bezogen auf die Bruchrechnung – auch hier gelingt es explizit, konzeptuelles und prozedurales Wissen zur Bruchrechnung theoriebasiert zu operationalisieren und empirisch zu trennen. Dabei setzen sich die Autor*innen mit vorangegangenen Operationalisierungen kritisch auseinander und formulieren zwei Hauptprobleme: (1) Aufgabeninhalte existierender Operationalisierungen lassen sich aus empirischer Sicht nicht eindeutig einer Wissensfacette zuordnen, (2) die Operationalisierungen scheinen häufig nur einen kleinen Teil der beiden Wissensfacetten abzudecken. Aus der Auseinandersetzung mit diesen Problemen geht eine Operationalisierung in Form eines aus 37 Items bestehenden Tests hervor. Das Vorgehen von Lenz und Kolleg*innen soll nachfolgend detaillierter betrachtet werden. Weitere Ausführungen finden sich auch in Abschnitt C Kapitel 5.4 dieser Arbeit. In einem ersten Schritt adressieren die Autor*innen die Frage, welche kognitiven Prozesse durch Aufgaben, die zum Ziel haben, konzeptuelles und prozedurales Wissen zur Bruchrechnung zu erheben, ansprechen. Dabei orientieren sie sich an der Taxonomie von Barzel et al. (2013) und formulieren die *Verbalisierung*, *Anwendung* und *Visualisierung* als die drei Repräsentanten kognitiver Prozesse. Dabei sind Aufgaben, in denen die Übersetzung von Zahlzeichen in visuelle Darstellungen oder andersherum gefordert werden, lediglich dem konzeptuellen Wissen zur Bruchrechnung zuzuordnen. Die Operationalisierung prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung umfasst demnach nicht die Visualisierung als Repräsentant kognitiver Prozesse, sondern ausschließlich die Verbalisierung und Anwendung. In früheren Operationalisierungen ist die Verbalisierung meist dem konzeptuellen Wissen vorbehalten (Lenz et al., 2019a). Die Autor*innen begründen ihre Entscheidung, prozedurales Wissen auch über Verbalisierungsaufgaben abzufragen durch die mathematikfachspezifische Einigkeit, dass unter prozedurales Wissen auch deklarative Facetten fallen (Barzel et al., 2013; Vollrath, 2001).

Um die drei übergeordneten kognitiven Prozesse Verbalisierung, Anwendung und Visualisierung mit Inhalt zu füllen, konzentrieren sich Lenz et al. (2019) aufgrund der Fehleranfälligkeit

(vgl. Kapitel 1.1) sowie der allgemein kontroversen Diskussion bezüglich des konzeptuellen und prozeduralen Wissens bei arithmetischen Operationen auf die Addition und Subtraktion von Brüchen. Damit zusammenhängend erscheint der Einbezug von Aufgaben zum Erweitern und Kürzen von Brüchen (Stichwort: Äquivalenz von Brüchen) unumgänglich, da Kenntnisse zum Erweitern und Kürzen für die korrekte Addition und Subtraktion von Brüchen mit ungleichnamigen Nennern entscheidend sind.

Operationalisierung des konzeptuellen Wissens:

Wie bezüglich der Definition konzeptuellen Wissens bereits verdeutlicht (vgl. Kapitel 1.2.1), steht hinsichtlich der Operationalisierung konzeptuellen Wissens zur Bruchrechnung der Zusammenhang zwischen dem konzeptuellen Wissen und GV als Repräsentanten von Verstehensprozessen im Vordergrund. Zur Erinnerung: GV ermöglichen das Übersetzen zwischen verschiedenen Darstellungsebenen (Schulz & Wartha, 2021). Bei den Darstellungsebenen kann es sich um die in Abbildung 6 gezeigten Repräsentationen (schriftliche Symbole, mündliche Symbole sowie Bilder, Gegenstände, Materialien) handeln. Unter Bezugnahme von GV werden die Lernenden darin unterstützt, einen Zusammenhang zwischen Symbolen, Zeichen und anderen Darstellungsformen, wie beispielsweise Bildern herzustellen (Wartha & Schulz, 2012). Die Herstellung diesen Zusammenhangs und der Fähigkeit der flexiblen Übersetzung zwischen Schriftlichem, Mündlichem sowie Bildern, Gegenständen und Materialien wird als *Verstehen* definiert (Padberg & Wartha, 2017; Roche, 2010). Die Ausbildung von GV trägt demnach zum Verstehen bei und lässt sich als ein elementarer Teil des konzeptuellen Wissens (zur Bruchrechnung) beschreiben (Bailey et al., 2014; Mou et al., 2016; Siegler & Pyke, 2013).

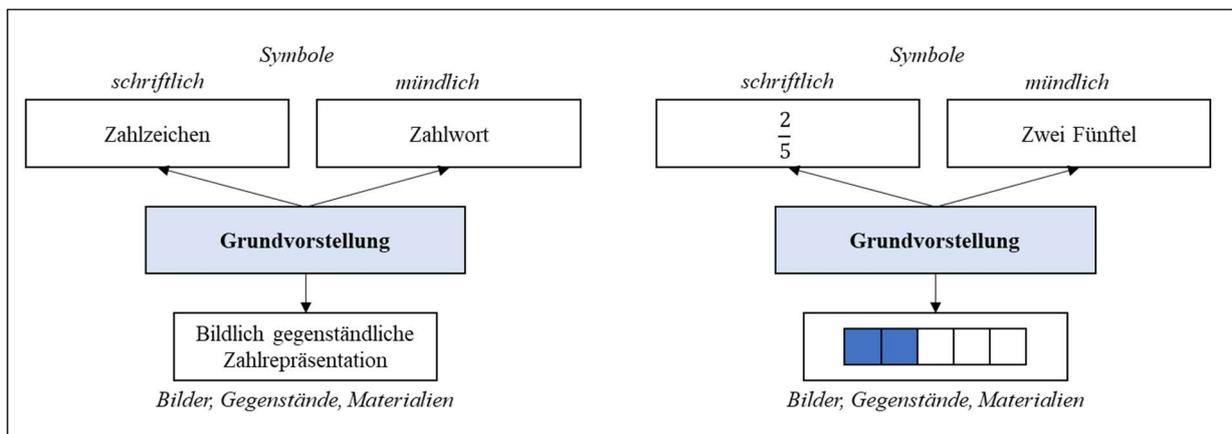


Abbildung 6: Übersetzungen zwischen verschiedenen Darstellungsebenen ermöglicht durch GV, eigene Darstellung in Anlehnung an Padberg und Wartha (2017, S. 1)

Nach vom Hofe (1995) sollten GV nicht als wünschenswerter idealisierter Zielzustand gesehen werden (normative Sichtweise), sondern als tatsächlich ausgebildete Vorstellungen. Die Ausbildung adäquater GV ist beim Umgang im Allgemeinen mit Mathematik, vor allem aber im Speziellen mit Bruchzahlen von besonderer Relevanz, denn: GV erlauben es den Schüler*innen eine Sinnhaftigkeit hinter Symboliken und Verfahren zu erkennen (Prediger, 2009; vom Hofe, 1995; Winter, 1999) und haben dementsprechend eine hohe Wirksamkeit hinsichtlich der Lösungsquoten von Lernenden. Das heißt: Lernende mit adäquat ausgebildeten GV lösen (Bruchrechen)Aufgaben mit einer höheren Wahrscheinlichkeit als Lernende ohne oder mit nicht adäquaten GV (Pekrun et al., 2006).

GV können sich zum einen spezifisch auf Bruchrechenoperationen beziehen. Bezüglich des Addierens und Subtrahierens von Brüchen (vgl. Kapitel 1.1.1) bleiben die GV der natürlichen Zahlen erhalten. Subtrahieren wird mit Wegnehmen, Ergänzen, Teilmengen oder Unterschiedsbestimmungen und Addieren mit Zusammenfassen oder Hinzufügen assoziiert (Malle, 2004; Schulz & Wartha, 2021). Das Konzept der Äquivalenz von Brüchen unterliegt der GV des Verfeinerns (Erweitern) und Vergröbern (Kürzen) von Unterteilungen (Malle, 2004; Padberg & Wartha, 2017).

Zum anderen existieren GV, die sich nicht einer einzelnen Bruchrechenoperation zuordnen lassen. Zu diesen „generellen GV“ existieren verschiedene Systematiken (z. B. Malle, 2004; Padberg, 2009). Unabhängig von der Systematik sind die GV nicht vollumfänglich voneinander trennbar und Überschneidungen der einzelnen GV können festgestellt werden, wodurch ein flexibler Wechsel zwischen den GV möglich ist (Padberg & Wartha, 2017; Schink, 2013). Ein Ziel von Mathematikunterricht ist ein möglichst vielseitiger Aufbau verschiedener GV zu Bruchzahlen (vom Hofe et al., 2005). Die zwei wohl prominentesten GV sind der *Bruch als Anteil eines Ganzen* sowie der *Skalenwertaspekt*, welche auch für die Operationalisierung des in dieser Arbeit eingesetzten Bruchrechentests von besonderer Bedeutung sind.

GV – Bruch als Teil eines Ganzen:

Die GV *Bruch als Teil eines Ganzen* lässt sich besonders anschaulich durch verschiedene Darstellungen einführen und fördern (z. B. Pizza oder Kuchen) (Kollhoff, 2021). Die GV des Bruch als Teil eines Ganzen setzt einen Teil mit einem Ganzen in Beziehung (Wartha & Güse, 2009), dabei markiert bei einem Bruch $\frac{m}{n}$ (im Beispiel aus Abbildung 7 handelt es sich um den Bruch $\frac{3}{5}$) der Nenner $n = 5$ die Anzahl der Teile, in die ein Ganzes zerlegt wird. Der Zähler $m = 3$ wiederum gibt die Anzahl der zu betrachtenden Teile an (Padberg & Wartha, 2017). Was aber

ist „das Ganze“? Dabei kann es sich um ein Objekt (z. B. Pizza oder Kuchen) handeln, ebenso kann aber auch eine Größe oder diskrete getrennte Objekte das Ganze repräsentieren (z. B. die Teile eines Puzzles) (Kollhoff, 2021). Bei der GV Bruch als Teil eines Ganzen ist vor allem die Verwendung verschiedener Darstellungen, bzw. der Wechsel zwischen diesen Darstellungen relevant. Das bedeutet konkret: Die Schüler*innen sollten befähigt werden, Brüche aus einer Darstellung abzulesen, sie aber ebenso selber in einer (vorgegebenen) Darstellung zu markieren (Kollhoff, 2021; Postel, 1981).

Dem Verständnis des korrekten Ablesens sowie Markierens liegen die folgenden Fragen zugrunde:

1. „Was ist das Ganze?
2. In wie viele Teile ist das Ganze zerlegt worden?
3. Sind die Teile jeweils gleich groß?
4. Wie groß ist jedes Teil bezogen auf das Ganze?
5. Wie viele Teile sind [...] zusammengefasst worden?“ (Padberg & Wartha, 2017, S. 28).

Dabei gilt:

Bezeichnen wir allgemein durch e eine Größeneinheit [...], so ist $\frac{m}{n}e$ mit $m, n \in \mathbb{N}$ eine Kurzschreibweise für $(e : n) \cdot m$. Hierbei gibt der Nenner n an, in wieviel gleichgroße Teile wir einen Repräsentanten der Größe e zerlegen müssen, der Zähler m , wieviele dieser Teile wir zusammenfassen müssen, um einen Repräsentanten der Größe $\frac{m}{n}e$ zu erhalten (Padberg, 1995, S. 45).

Aufgrund der Lösung des Schülers aus Abbildung 7 lässt sich vermuten, dass dieser über keine ausgeprägte GV des Bruch als Teil eines Ganzen verfügt. Die Aufgabe fordert $\frac{3}{5}$ eines Rechtecks zu färben. Das Rechteck ist in zehn Teile zerlegt. Der Schüler hat drei dieser Teile markiert. Entscheidend für die korrekte Bearbeitung der Aufgabe scheint die Frage 2 „In wie viele Teile ist das Ganze zerlegt?“. Da der Nenner des vorgegebenen Bruchs nicht mit der Einteilung des Rechtecks (also des Ganzen) übereinstimmt, ist das „Gleichmachen“ des Nenners und der Anzahl der Teile des Rechtecks notwendig zur Bearbeitung der Aufgabe. Dies kann entweder durch Erweitern des vorgegebenen Bruchs auf $\frac{6}{10}$ oder die Veränderung der Einteilung des

Rechtecks auf fünf gleich große Teile geschehen. Eine Aufstellung weiterer beispielhafter Aufgaben zum konzeptuellen Wissen sind Tabelle 3 zu entnehmen.

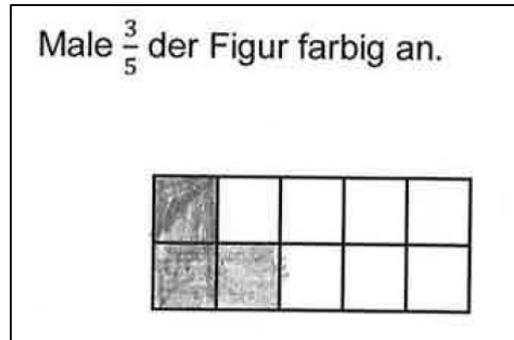


Abbildung 7: Aufgaben „Wechsel der Bruchdarstellung“ inklusive Schülerlösung

GV – Skalenwertaspekt:

Nach Padberg (2009) ist der Skalenwertaspekt – Schulz und Wartha (2021) sprechen auch von der GV Bruch als Positionsangabe – eine weitere GV hinsichtlich des Verständnisses bezüglich des Umgangs mit Bruchzahlen. Unter dem Skalenwertaspekt wird das Wissen verstanden, das dazu befähigt, Brüche auf einer Skala zu verorten (Padberg, 2013). Der Skalenwertaspekt wird häufig mit dem Zahlenstrahl als beispielhafte Skala in Verbindung gebracht, bzw. anhand diesem eingeführt und gefördert, denn: Der Zahlenstrahl weist bezüglich seines Abstraktionsgrads und der vielfältigen Anwendungsmöglichkeit innerhalb verschiedener Zahlenräume ein großes Potenzial auf. Besonders beim Ablösen von konkreten Repräsentanten (z. B. Pizza) hin zu dem Aufbau des Wissens über Zahlbeziehungen (unabhängig von Repräsentanten) wird der Zahlenstrahl als geeignetes Hilfsmittel angesehen (Schulz & Wartha, 2021; Ruwisch, 2015). Auch beim Abbilden von Relationen von Brüchen (auch für gleichwertige Brüche, vgl. Kapitel 1.1.2) stellt der Zahlenstrahl einen Mehrwert dar (Schulz & Wartha, 2021; Motzer, 2018; Padberg & Wartha, 2017). Mit dem Zahlenstrahl kann in zwei Richtungen gearbeitet werden: (1) die Lernenden tragen vorgegebene Brüche an einen Zahlenstrahl ein, (2) die Lernenden lesen Brüche von einem Zahlenstrahl ab. Für das Darstellen von Brüchen am Zahlenstrahl ist folgendes Verständnis zum richtigen Umgang vorausgesetzt (vgl. Tabelle 2):

Tabelle 2: Voraussetzungen hinsichtlich des Verständnisses für die korrekte Darstellung von Brüchen am Zahlenstrahl, Schulz und Wartha (2021), S. 210

Bruch	Darstellung am Zahlenstrahl
Ist die Einheit verstanden?	Wo ist die 1?
Was gibt der Nenner an?	Wie wird unterteilt?
Was gibt der Zähler an?	Wie viele Unterteilungen werden gesucht?

Die Schülerin aus Abbildung 8 scheint Probleme hinsichtlich der in Tabelle 2 formulierten Verständnisfragen hinsichtlich des Skalenwertaspekts mitzubringen. An einem bereits eingeteilten Zahlenstrahl ist gefordert, die Brüche $\frac{21}{23}$, $\frac{5}{9}$ sowie $\frac{8}{3}$ abzutragen. Der Schülerin gelingt es nicht, die Position der drei Brüche zu identifizieren. Die Platzierung der beiden Brüche $\frac{21}{23}$ und $\frac{5}{9}$ auf der Position $\frac{1}{2}$ deutet auf ein fehlendes Verständnis für das Verhältnis von Zähler und Nenner hin.

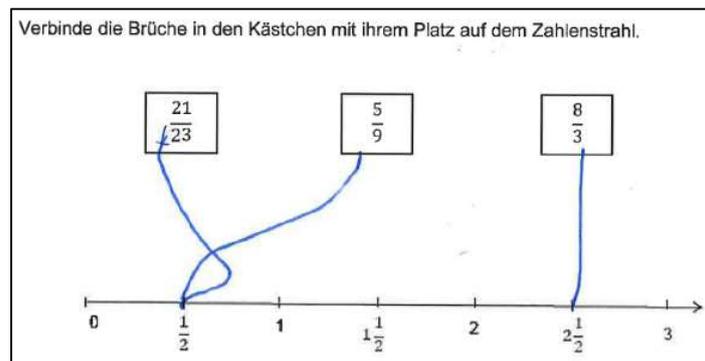
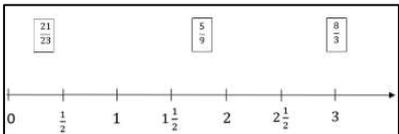
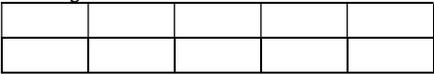


Abbildung 8: Aufgabe „Darstellen von Brüchen am Zahlenstrahl“ inklusive Schülerinlösung

Operationalisierung des prozeduralen Wissens:

Aufgaben, die prozedurales Wissen (zur Bruchrechnung) fordern, bestehen meist aus symbolischen Repräsentanten, die nicht in andere Formen übersetzt werden müssen (Lenz et al., 2019a; vgl. Aufgabe aus Abbildung 2). Prozedurales Wissen zur Bruchrechnung wird demnach vor allem über „einfache“ Rechenaufgabe erfasst. In dem Test von Lenz et al. (2019a) sind bereits erprobte Bruchrechenaufgaben von Padberg (1995) integriert. Beispielhafte Aufgaben sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Operationalisierung des konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung nach Lenz et al. (2019, S. 8)

	Aufgabentyp (+ ggf. assoziierte GV)	Beispielaufgabe
Konzeptuell	Verbalisierung	Die Erklärungsaufgaben beziehen sich auf die explizite Verbalisierung von konzeptuellem Wissen. Rosa sagt: „ $\frac{3}{7}$ ist größer als $\frac{3}{5}$, weil 7 größer als 5 ist.“ Erkläre, warum sie nicht recht hat.
	Anwendung	Die Aufgaben zum Zahlenstrahl beziehen sich auf den Prozess der Anwendung des Konzepts der Brüche unter dem Aspekt des <i>Skalenwerts</i> . Verbinde die Brüche in den Kästchen mit ihrem Platz auf dem Zahlenstrahl. 
	Visualisierung	Die Übersetzungsaufgaben beziehen sich auf den Prozess der visuellen Darstellung von Brüchen in Bezug auf die GV <i>Bruch als Teil eines Ganzen</i> . Male $\frac{3}{5}$ des Rechtecks an. 
Prozedural	Verbalisierung	Es wird verlangt eine Anleitung mit Verweis auf konkrete Verfahren zu schreiben. Schreibe eine Anleitung für das Addieren von Brüchen.
	Anwendung • Erweitern & Kürzen • Umwandeln • Addition & Subtraktion	Rechenaufgaben, die sich auf den Anwendungsprozess beziehen. Setze die richtige Zahl in das Kästchen ein! $\frac{12}{28} = \frac{\square}{\square} =$ Schreibe den unechten Bruch als gemischte Zahl. $\frac{14}{5} =$ Berechne: $\frac{5}{8} - \frac{1}{3} =$

Zusammenfassung

Die Bruchrechnung gehört zu den besterforschten mathematischen Inhalten. Studienergebnisse machen deutlich, dass die Bruchrechenleistung ein wichtiger Prädiktor für schulischen und außerschulischen Erfolg sind (Kapitel 1). Trotz intensiver Forschung und verschiedener Maßnahmen handelt es sich bei der Bruchrechnung um einen der herausforderndsten mathematischen Inhalte (Kapitel 1.1). Für die Addition und Subtraktion (Kapitel 1.1.1), das Erweitern und Kürzen sowie das Umwandeln von Brüchen (Kapitel 1.1.2) zeigen sich spezifische „typische“ Schülerfehler.

Um Herausforderungen hinsichtlich des Umgangs mit Bruchzahlen zu begegnen, sollten die beiden Wissensfacetten konzeptuelles sowie prozedurales Wissen zur Bruchrechnung gefördert werden. Insbesondere konzeptuelles Wissen rückt in den Fokus wissenschaftlicher Diskussion, da nur durch die Förderung dieser Wissensfacette nachhaltiges Lernen ermöglicht wird. Aber auch prozedurales Wissen zur Bruchrechnung ist wichtig, um Bruchrechenoperationen überhaupt durchführen zu können und eine kognitive Entlastung zu schaffen (Kapitel 1.2.2).

Zur Überprüfung und Erkennung von Wissenslücken hinsichtlich konzeptuellen sowie prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung stellen Lenz et al. (2019) einen Test bereit, der nachweislich beide Wissensfacetten voneinander trennt. Der Test operationalisiert konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung über GV und prozedurales Wissen über Aufgaben zu Bruchrechenoperationen (Kapitel 1.2.3).

Begriffserklärungen

Konzeptuelles Wissen (zur Bruchrechnung): Konzeptuelles Wissen gilt allgemein als das „Wissen, warum“ und umfasst vernetztes Wissen über Strukturen und Zusammenhänge (bezogen auf den Umgang mit Bruchzahlen). Konzeptuelles Wissen gilt als Basis für Verständnis und steht in enger Verbindung zu GV (zur Bruchrechnung).

Prozedurales Wissen (zur Bruchrechnung): Prozedurales Wissen wird meist als „Wissen, wie“ bezeichnet und der Erwerb erfolgt durch das Erlernen von Handlungsabfolgen. In Bezug zur Bruchrechnung wird insbesondere die Anwendung von Bruchrechenregeln mit dem prozeduralen Wissen assoziiert.

Zusammenhänge zentraler Variablen

Das Vorwissen der Lernenden hat potenziell einen Einfluss auf die Bruchrechenleistung.

2 Bildung in einer digitalen Welt: Digitale Medien im (Fach)Unterricht

Überblick des Kapitels

Digitale Medien werden im schulischen Kontext aufgrund verschiedener Reformen immer präsenter, wodurch sich Schule an die Lebensrealität von Schüler*innen anpasst. Unter anderem aufgrund des Einzugs digitaler Medien in Schule wird das Potenzial digitaler Medien hinsichtlich der Unterstützung von Lehr-Lern-Prozessen im Allgemeinen und herausfordernder Themen wie der Bruchrechnung im Speziellen immer häufiger Thema der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Dennoch bedarf es weiterer Forschung hinsichtlich des lernwirksamen Einsatzes digitaler Medien. Nach einer anfänglichen Definition des Begriffs „digitale Medien“ (2.1) wird daher auf Befunde zu den Potenzialen digitaler Medien eingegangen und die Varianz empirischer Erkenntnisse dargestellt (2.2). Darauf aufbauend werden digitale Lernplattformen als Unterkategorie digitaler Medien definiert (2.3.1), um anschließend Befunde zu digitalen Lernplattformen zu thematisieren (2.3.2), wobei ein Schwerpunkt auf dem implementiertem Feedback und der Wirkung dieses Feedbacks auf den Lernerfolg der Schüler*innen liegt (2.3.2.1). Außerdem wird ein Bezug zum vorangegangenen Kapitel hergestellt, in dem die Fördermöglichkeiten konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung durch digitale Lernplattformen vorgestellt werden (2.3.2.2).

Digitale Medien nehmen für Lernende eine immer weiterwachsende Rolle ein und sind mittlerweile selbstverständlicher Teil ihres alltäglichen Lebens (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2016; Eickelmann et al., 2019; C. Fischer, 2017; Heusinger, 2022; Krotz, 2007). So zeigen Ergebnisse der ICILS Studie aus 2018, dass einem Großteil der Zwölf- bis 19-Jährigen ein Smartphone sowie ein Computer oder Laptop zur Verfügung stehen und diese Geräte täglich für mehrere Stunden genutzt werden (Eickelmann et al., 2019). Auch aufgrund der Allgegenwärtigkeit digitaler Medien bestimmt die Frage um ihr Potenzial insbesondere bei der Vermittlung anspruchsvoller Themen wie der Bruchrechnung immer häufiger den wissenschaftlichen Diskurs. Inwiefern digitale Medien bereits in schulischen Lehr-Lern-Prozessen Integration gefunden haben und welche wissenschaftlichen Erkenntnisse es zu ihrem Einsatz gibt, wird nachfolgend dargestellt.

Als Beginn der Digitalisierung des Mathematikunterrichts gilt die Einführung des Taschenrechners in den 1970er-Jahren, woraufhin nach und nach Technologien wie z. B. Computer Einzug in Schulen finden (Barzel & Klinger, 2022) und sich diese vorhandenen Technologien stetig

weiterentwickeln (Petko, 2020). Für deutsche Schulen gilt allerdings, dass digitale Medien vor allem im Mathematikunterricht nur wenig zum Einsatz kommen (Eickelmann et al., 2019). Allerdings kann die reflektierte Nutzung digitaler Medien in Lehr-Lern-Prozessen für die Ausbildung computer- und informationsbezogener Kompetenzen von besonderer Bedeutung sein. Nur durch diese digitalen Kompetenzen ist es Personen möglich „[...] digitale Medien zum Recherchieren, Gestalten und Kommunizieren von Informationen zu nutzen und diese zu bewerten, um am Leben im häuslichen Umfeld, in der Schule, am Arbeitsplatz und in der Gesellschaft erfolgreich teilzuhaben“ (Eickelmann et al., 2019, S. 9). „Kompetent“ im Umgang mit digitalen Medien zu sein, befähigt eine Person demnach, Medien sinnvoll und reflektiert nutzen zu können (Breiter et al., 2010). Es ist durchaus davon auszugehen, dass Schüler*innen mit hohen digitalen Kompetenzen mehr von digitalen Angeboten profitieren. Aufgrund der Relevanz digitaler Medien für schulische wie auch außerschulische Lebensprozesse sowie der Allgegenwärtigkeit und dem stetig wachsenden Angebot digitaler Medien sieht sich das Bildungssystem dem Druck ausgesetzt, sich im Bereich der Digitalisierung weiterzuentwickeln (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2016; C. Fischer, 2017; Heusinger, 2022; Petko, 2020). Dabei führte die Diskussion um die Digitalisierung von Schule zu verschiedenen bildungspolitischen Maßnahmen. Im Jahr 2014 beispielsweise präsentierte der Bund die „Digitale Agenda 2014-2017“ mit dem Ziel „Deutschlands Zukunftsfähigkeit zu sichern“ (Die Bundesregierung, 2014). Dem folgte 2016 unter anderem die Strategie „Bildung in der digitalen Welt“ (Kultusministerkonferenz, 2017) sowie die Einigung zwischen Bund und Ländern über den 5 Milliarden schweren DigitalPakt Schule. Diese finanzielle Unterstützung des Bunds für die Länder soll dem Ausbau der digitalen Infrastruktur dienen. Die Länder selbst sind durch die Vereinbarung angehalten, neue pädagogische Konzepte hinsichtlich der Implementation digitaler Medien in Lehr-Lern-Prozesse zu entwickeln (C. Fischer, 2017; Ternès von Hattburg & Schäfer, 2020). Auch wenn die Digitalisierung von Bildungsprozessen durch diese Maßnahmen bereits weitverbreitete Aufmerksamkeit erhält, rückte die Unterstützung von Lehr-Lern-Situationen durch digitale Medien aufgrund der pandemischen Lage und der damit einhergehenden zeitweisen Schulschließungen verstärkt in den Fokus politischer und gesellschaftlicher Diskussionen (Reinhold et al., 2021). Auch Lehrkräfte machen sich zum Ziel, digitale Lernangebote vermehrt in ihren Unterricht zu integrieren (Vodafone Stiftung Deutschland, 2020).

2.1 Begriffsdefinition

Es gibt eine stetig wachsende Zahl an (wissenschaftlichen) Beiträgen, die sich mit digitalen Medien auseinandersetzen. Dabei werden häufig synonyme Begrifflichkeiten verwendet, wie beispielsweise „neue Medien“, „digitale Werkzeuge“, „Technologie- oder Computereinsatz“

(Thurm, 2020) oder aber auch Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT, englisch: ICT) (Petko, 2020). Meist wird eine genaue Definition der Begriffe ausgespart – vermutlich aufgrund der intuitiven Verwendung, aber auch aufgrund dessen Unschärfe, deren Ursprung sich in der rasanten Entwicklung im Bereich der digitalen Medien vermuten lässt. Medien im Allgemeinen können gegenständlich (z. B. Bücher) sein oder aber auch technische Geräte (z. B. iPads) umfassen (Petko, 2020). (Digitale) Medien umfassen häufig aber auch „Medienformate (z. B. Online-Zeitungen, Online-Videos), Medieninhalte (z. B. Software, Webseiten, Foren), oder ihre zeichenhaften Grundbausteine (z. B. Text, Bild, Audio, Video)“ (Petko, 2020, S. 12). Aus Sicht der Medien- und Kommunikationswissenschaften gelten (digitale) Medien „als Träger und Vermittler von Signalen in kommunikativen Zusammenhängen“ (Schaumburg & Prasse, 2019, S. 17). Eine ähnliche Arbeitsdefinition formuliert Petko (2020): „[digitale] Medien sind Werkzeuge zur Erfassung, Speicherung, Verarbeitung und Übermittlung von Informationen“ (S. 12). Etwas kann also nicht „per se“ als Medium anerkannt werden, sondern erst, wenn es die Rolle als Vermittler einnimmt (Raithel et al., 2009), indem Informationen verarbeitet und/oder gespeichert werden. In Bezug zum Fach Mathematik ist das Medium ein Vermittler zwischen dem mathematischen Lernziel und dem Wissen der Lernenden (Dilling & Pielsticker, 2020).

Medien lassen sich aus vier Perspektiven betrachten: (1) der technischen Perspektive, (2) der wahrnehmungstheoretischen Perspektive, (3) der semiotischen Perspektive und (4) der systemisch-kulturtheoretischen Perspektive (Mock, 2006; Swertz, 2009). Die technische Perspektive umfasst unter anderem elektronische Medien, die laut der Klassifizierung von Pross (1972) als Tertiärmedien bezeichnet werden. „Unter dieser [technischen] Perspektive werden unter Medien technische Mittel verstanden, mit denen über die räumlichen und zeitlichen Grenzen direkter Kommunikation hinweg Signale zwischen einem Sender und einem Empfänger übertragen werden können.“ (Schaumburg & Prasse, 2019, S. 18). Elektronische Medien bzw. Tertiärmedien bezeichnen also technische Geräte (wie beispielsweise Kameras, Computer, Tablets, etc.) (Schaumburg & Prasse, 2019). Aufgrund der hohen Interaktivität und der vereinfachten Kommunikation erschließt Faßler (1997) eine weitere Kategorie: die Quartärmedien, die als Online-Medien bezeichnet werden. Digitale Medien lassen sich hinsichtlich dieser Klassifizierung also den Tertiär- und Quartärmedien zuordnen.

Eigenschaften digitaler Medien lassen sich besonders gut im Vergleich zu analogen Medien (z. B. Schulbüchern) herausstellen (Schaumburg & Prasse, 2019). Schaumburg und Prasse (2019) leiten aus den Definitionen von Tulodziecki (2010) und Mock (2006) ein Begriffsverständnis

von Medien ab, welches die Kernfunktion von Medien sowie die Besonderheit digitaler Medien gegenüber Medien im Allgemeinen herausstellt:

[Digitale] Medien im *engeren Sinn* sind Mittler, die technisch unterstützt abbildhafte oder symbolische Zeichen erzeugen und übertragen, speichern, wiedergeben oder verarbeiten. Im *weiteren Sinn* sind Medien Formen des sozialen und institutionalisierten Gebrauchs von Kommunikationsmitteln, die Akteure, Regelungen und Institutionen einschließen und ihren Ausdruck finden in der Herausbildung und Stabilisierung bevorzugter (allerdings veränderlicher) Verwendungsweisen dieser Mittel und deren Einbindung in den Alltag der Menschen (Schaumburg & Prasse, S. 24).

Der Unterschied von digitalen zu analogen Medien ist demnach, dass Inhalte innerhalb digitaler Medien keinen menschlichen Eingriff benötigen, sondern durch das Medium selbst angepasst oder gar hergestellt werden können (Zorn, 2011). Dabei bieten digitale Medien die Möglichkeit zur Verarbeitung von Unmengen an Informationen durch Hardware zur Erfüllung mehrerer, ggf. gleichzeitig laufender Funktionen durch Software, zur vereinfachten Speicherung, Reproduktion und Verteilung von Daten und Informationen, zur Teilung von Kapazitäten durch Netzwerke, zum interaktiven und adaptiven Arbeiten sowie zu neuen Kommunikationsformen. Aufgrund dieser erweiterten Funktionen von digitalen Medien im Vergleich zu analogen Medien hat sich das Begriffsverständnis von Medien im Allgemeinen verändert (Petko, 2020).

Die Funktion digitaler Medien kann vor allem im Bereich des Übens angesiedelt werden. Hinsichtlich dessen bieten digitale Medien die Möglichkeit der Interaktion zwischen Lernenden und digitalem Medium. Eben aufgrund dieser Interaktion, ohne die zwangsläufige Anwesenheit einer Lehrkraft rücken digitale Medien insbesondere zuzeiten von eintretenden Schulschließungen in den Fokus bildungspolitischer Maßnahmen. Inwiefern digitale Medien das Lernen von Schüler*innen tatsächlich unterstützen können, bzw. was zu dem Potenzial digitaler Medien bekannt ist, wird nachfolgend dargestellt.

2.2 Zur Wirksamkeit digitaler Medien

Im Rahmen der Auseinandersetzung mit digitalen Medien wird unter anderem vom Potenzial des orts- und zeitunabhängigen Arbeitens gesprochen sowie der schnellen Informationssuche, -speicherung und -weiterverarbeitung (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2016). Dabei sollen digitale Medien vor allem individualisiertes und kooperatives Lernen unterstützen können (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2016; Heusinger, 2022). Außerdem

weisen empirische Befunde darauf hin, dass die Nutzung digitaler Medien zum Bildungszwecke die schulische Leistung verbessert (Sanders et al., 2019). Allerdings erscheinen Studienergebnisse zur Wirksamkeit digitaler Medien als inkonsistent. Meta-Analysen zum Einsatz digitaler Medien zeigen zwar vielversprechende Ergebnisse, die Effektgrößen variieren allerdings stark (Cheung & Slavin, 2013; Ellington, 2003; Hattie, 2009; Hillmayr et al., 2020; Li & Ma, 2010; Steenbergen-Hu & Cooper, 2014). Schwankungen hängen unter anderem von der konkreten Gestaltung des digitalen Mediums sowie dem Studiendesign – damit ist z. B. der konkrete Einsatz des digitalen Mediums gemeint – ab (Hattie, 2009; Hillmayr et al., 2020; Thurm, 2020). Auch konkret für das Fach Mathematik und die Naturwissenschaften scheinen digitale Medien den Lernerfolg steigern zu können, wie die Meta-Analyse von Hillmayr et al. (2020) zeigt. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass der Einsatz digitaler Medien im Vergleich zu traditionellen Medien die Leistung von Schüler*innen stärker fördert. Außerdem berichten die Lernenden eine positivere Einstellung gegenüber dem Fach (Hillmayr et al., 2017). Aber auch diese Meta-Analyse zeigt eine große Varianz in den Effektstärken. Aussagen über eine allgemein positive Wirkung digitaler Medien können nicht getroffen werden (Thurm, 2020; Schaumburg, 2017). In der Debatte um die Wirksamkeit von digitalen Medien geht es um die Fragen, „auf welche Weise besonders gut mit Medien gelernt werden kann und für welche Personen sich bestimmte Medien und Lernarrangements besonders eignen“ (Petko, 2020, S. 46). Diesbezüglich herrscht Einigkeit darin, dass digitale Medien traditionelle nicht ersetzen, sondern ergänzend zu ihnen eingesetzt werden sollten: „digitales Lernen [kann] analoges Lernen nie ersetzen, umgekehrt wird analoges Lernen in einer zunehmend digitalisierten Welt nicht auf digitales Lernen verzichten können – es geht vielmehr um ein kluges Ineinandergreifen und gegenseitiges Unterstützen im Interesse nachhaltiger Lernerfolge von Kindern und Jugendlichen“ (Bertelsmann Stiftung, 2015, S. 9). Aufgrund der Inkonsistenz von Studienergebnissen, aber auch dem Mangel an Untersuchungen zu den spezifischen digitalen Lernmedien gilt es digitale Medien (weiter begleitend) zu beforschen (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2016; Drijvers, 2016).

2.3 Lernplattformen als eine Kategorie digitaler Medien

2.3.1 Begriffsdefinition und Klassifizierung

Ein digitales Medium, welches vor allem hinsichtlich der Interaktivität zwischen den Lernenden und dem Medium besonderes Potenzial aufweist, sind digitale Lernplattformen. Eine einheitliche Definition scheint allerdings, wie schon bei den Ausführungen zu digitalen Medien, auch für digitale Lernplattform nicht zu existieren. Zum einen wird eine Vielzahl an Begriffen

synonym verwendet (z. B. Lehr-Lern-Software, Edutainment, Lernprogramm...) (Kerres, 2018; Pallack, 2018), zum anderen liegen dem Begriff unterschiedliche Bedeutungen in wissenschaftlichen Arbeiten zugrunde.

Petko (2020) folgend sind Lernplattformen in der Lage, Reaktionen auf Eingaben der Lernenden zu erzeugen. Lernplattformen speichern, verarbeiten und nehmen demnach Informationen so auf, dass Lernende mit ihnen im Unterricht oder außerschulisch interagieren können. Eine Definition, die sich nah an den Eigenschaften digitaler Medien orientiert. Thurm und Graewert (2022) werden in ihren Ausführungen konkreter: „[...] unter dem Begriff ‚Mathematik-Lernplattform‘ [werden] alle Angebote gefasst, welche webbasiert zugänglich sind und eines oder mehrere der folgenden Elemente bereitstellen: Lerninhalte, Aufgaben, Feedback oder Hilfen“ (S. 4). Eine Lernplattform bezeichnet also kein digitales Gerät, sondern bedarf diesem und dient selbst als ein Träger von Aufgaben zum Üben (mathematischer) Inhalte. Lernplattformen geben dem*r Anwendenden Feedback auf die Eingaben (Daniela & Rudolfa, 2019) und zeichnen sich somit durch eine Interaktivität zwischen Lernendem und Lernplattform aus (Petko, 2020). Im Allgemeinen geht es also um Anwendungen, in denen Aufgaben implementiert sind, die nicht von den Lehrkräften selbst, sondern außerschulischen Akteur*innen entwickelt (Daniela & Rudolfa, 2019) und in denen Eingaben von Lernenden gefordert werden (vgl. Abbildung 9). Die Lernplattformen analysieren die von den Lernenden getätigten Eingaben und reagieren entsprechend ihrer Programmierung, z. B. durch Feedback darauf (Petko, 2020). Durch die genannten Eigenschaften fallen Kalkulationsanwendungen wie beispielsweise „Excel“ oder Simulationsprogramme wie „GeoGebra“ aus dem dieser Arbeit zugrunde liegendem Begriffsverständnis digitaler Lernplattformen heraus. Auch Hypermediasysteme, die verschiedene digitale Ressourcen (wie z. B. Texte, Videos oder Bilder) vereinen und häufig Nennung in Bezug zu digitalen Medien finden (Hillmayr et al., 2017), werden durch die vorliegende Definition ausgeschlossen.

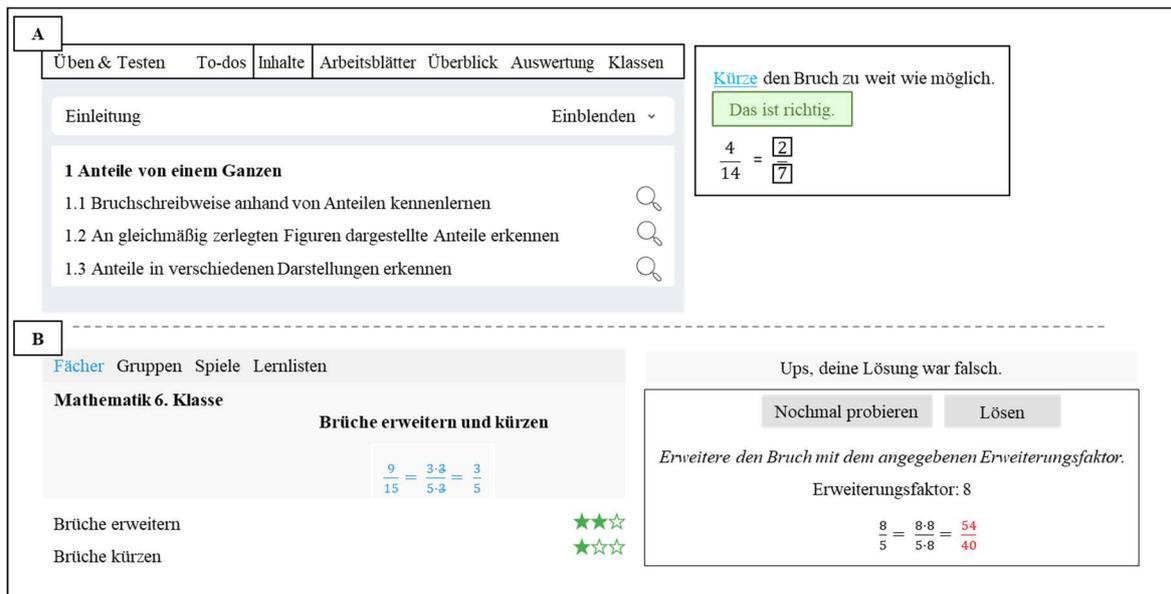


Abbildung 9: Beispielhafte Nutzeroberfläche und Aufgaben inklusive Feedback zweier beispielhafter Lernplattformen (A: bettermarks, B: Anton), eigene Darstellung nach bettermarks GmbH (2023) und solocode GmbH (2023)

Digitale Lernplattformen lassen sich Baumgartner und Payr (1999) folgend unter anderem in Drill and Practice-Programme (DPP) und Tutorensysteme klassifizieren. Hillmayr et al. (2020) sprechen zusätzlich von intelligenten tutoriellen Systemen. Eine zusammenfassende, in diesem Beitrag genutzte Differenzierung ist Abbildung 10 zu entnehmen. Allerdings handelt es sich um eine idealtypische Klassifizierung, die in der praktischen Einordnung von Lernplattformen zu den genannten Kategorien kaum umsetzbar ist und fließende Grenzen aufweist (Weddehage, 2011).

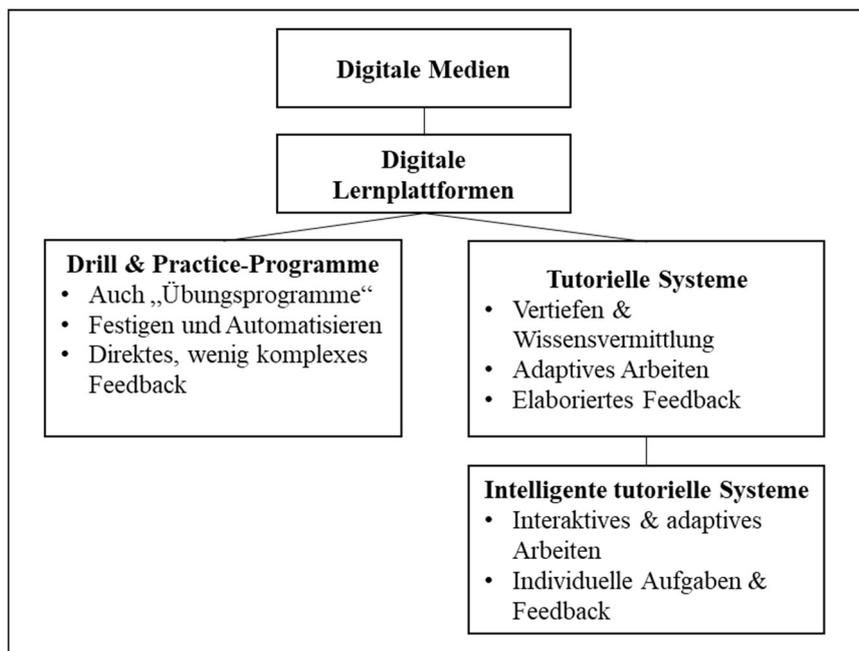


Abbildung 10: Kategorisierung digitaler Lernplattformen

DPP:

DPP, auch bekannt unter dem Begriff „Übungsprogramme“, gelten als die einfachste Form von Lernplattformen. Ziel ist es nicht, neues Wissen zu vermitteln, sondern bereits erlangtes Wissen durch Wiederholungen zu festigen und automatisieren (Biffi, 2002; Hillmayr et al., 2017). Zu diesem Zwecke werden den Lernenden Aufgaben zur Verfügung gestellt, auf die die Programme meist direktes, jedoch kein individuelles und wenig komplexes Feedback – hauptsächlich bezüglich der Korrektheit („Richtig“/„Falsch“) oder der erreichten Punkte – präsentieren (Hillmayr et al., 2017; Petko, 2020). Multiple-Choice-Aufgaben, bei denen eine oder mehrere richtige Lösungen aus mehreren Lösungsvarianten ausgewählt werden müssen, Zuordnungsaufgaben, Lückentexte und die freie Eingabe von Lösungszahlen oder -wörtern sind häufige Aufgabentypen in diesen Übungsprogrammen (Petko, 2020).

(Intelligente) Tutorielle Systeme:

Tutorielle Systeme erweisen sich als deutlich komplexer im Vergleich zu DPP und „können bei optimaler Realisierung die Funktionen einer Lehrperson übernehmen“ (Nattland & Kerres, 2009, S. 322). Tutorielle Systeme zielen also darauf ab, einen Dialog zwischen Lernenden und der Lernplattform zu generieren (Graesser et al., 2018). Dazu wird zu jeder Aufgabe und jedem möglichen Lösungsschritt Feedback formuliert, weshalb die Programmierung solcher tutoriellen Systeme viele Ressourcen in Anspruch nimmt (Petko, 2020). Tutorielle Systeme zeichnen sich durch direktes Feedback zu jeder Aufgabe inklusive zusätzlicher Hinweise aus. Das Feedback von tutoriellen Systemen erweist sich damit als komplexer als das Feedback von DPP (Faber et al., 2017; Maier et al., 2016; VanLehn, 2011). Außerdem bieten tutorielle Systeme adaptive Komponenten. Beispielsweise präsentieren die Programme passende Aufgaben auf Grundlage von Vorwissenstests. Den Lernenden selbst ist es möglich, Voreinstellungen zum Aufgabeninhalt und -schwierigkeit vorzunehmen (Schaumburg, 2017).

Als komplexeste Form tutorieller Systeme gelten die intelligenten tutoriellen Systeme (ITS), die sich durch lebensnahe Problemstellungen, interaktives Arbeiten und vielfältige adaptive Komponenten auszeichnen. Ziel von ITS ist das Vertiefen von Lerninhalten sowie die Vermittlung neuen Wissens (Hillmayr et al., 2017). So soll unter anderem problemlösendes Denken gefördert werden (Schaumburg, 2017). Die Lernenden werden Schritt für Schritt vom System durch die Aufgabenbearbeitung geleitet (VanLehn, 2011) und die Programme präsentieren individuelle Aufgaben und Feedback zu einzelnen Lösungsschritten abhängig vom Vorwissen

und Antwortverhalten der Lernenden (Hillmayr et al., 2017; Schütze et al., 2018). Darüber hinaus stehen den Lernenden Hilfen zur Bearbeitung des nächsten Aufgabenschritts zur Verfügung (feed forward) (Aleven et al., 2010; Koedinger & Aleven, 2007; VanLehn, 2011), wie beispielsweise Abbildung 11 zeigt. Zu dieser Kategorie lässt sich laut Holmes et al. (2018) beispielsweise die Lernplattform *bettermarks* zuordnen.

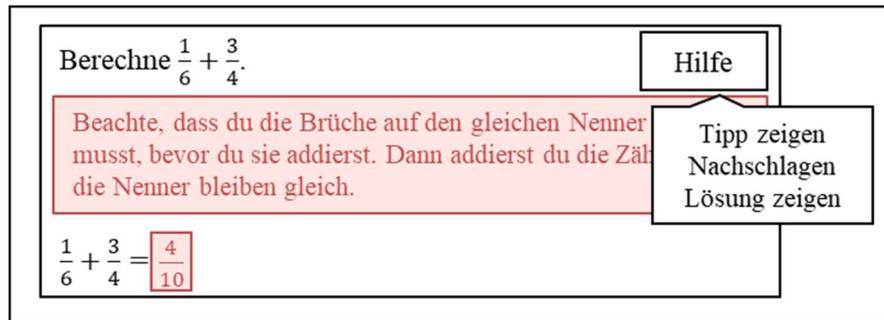


Abbildung 11: Beispielhaftes Feedback eines intelligenten tutoriellen Systems

Die Differenzierung digitaler Lernplattformen findet insbesondere hinsichtlich der Interaktion zwischen Plattform und Lernenden in Form des von der Plattform bereitgestellten Feedbacks statt. Das automatisiert bereitgestellte Feedback gilt dabei – unabhängig der Komplexität – als großes Potenzial digitaler Lernplattformen. Darüber hinaus wird Lernplattformen in der Debatte um die Potenziale digitaler Lernplattformen der Vorteil des „Schutzraums“ für Lernende, in dem sie in ihrem individuell benötigtem Tempo arbeiten und unbeobachtet Fehler produzieren und diese durch wiederholte Bearbeitung ausgleichen können, zugeschrieben (Euler & Holz, 1992; Schaumburg, 2017; Schulmeister, 1997). Insbesondere werden aber die „Adaptivität, Interaktivität und Individualität“ als Chance für die Optimierung von Lehr-Lern-Prozessen betont: „Jeder einzelne Lernende soll mit dem durch das Lernprogramm vertretenen Lehrer (lehrstoffbezogen) interagieren, wobei das Interaktionsgeschehen möglichst gut an den Unterstützungsbedarf des lernenden Individuums angepasst wird.“ (Tulis, 2010, S. 10). Empirische Erkenntnisse zu der Frage, ob und inwiefern digitale Lernplattformen den Lernprozess tatsächlich unterstützen, werden in nachfolgenden Ausführungen dargestellt.

2.3.2 Zur Wirksamkeit digitaler Lernplattformen

Die Lernwirksamkeit vor allem (intelligenter) tutorieller Lernplattformen scheint empirisch belegt (z. B. Cheung & Slavin, 2013; Hattie & Zierer, 2018; Ma et al., 2014; Steenbergen-Hu & Cooper, 2014). Eine Übersichtsstudie von Ma et al. (2014), die ITS mit anderen Kategorien von Lernplattformen vergleicht, zeigt beispielsweise, dass Lernen mit ITS unter anderem lehrkraftgesteuertem Lernen in großen Gruppen überlegen ist. Für das Fach Mathematik zeigen ITS

einen moderaten Effekt von $g = .35$. Allerdings sollen ITS nicht förderlicher sein als menschliche Tutoren – aber auch nicht weniger (VanLehn, 2011). Im Gegensatz dazu weisen ITS im Vergleich zu DPP eine höhere Wirksamkeit auf (Kulik & Fletcher, 2015). Auch in einer Meta-Analyse von Hillmayr et al. (2020) werden Studienergebnisse zum Einsatz digitaler Medien im Allgemeinen innerhalb des Fachs Mathematik sowie der Naturwissenschaften betrachtet. Dabei zeigen sich Effekte auf die Leistung von Lernenden für ITS ($g = .89, p < .05$), tutorielle Systeme ($g = .55, p < .05$) als auch DPP ($g = .58, p < .05$). Bei einem differenzierten Blick auf die Ergebnisse der Analyse wird jedoch die Heterogenität der Ergebnisse deutlich. Ein Großteil der mit (intelligenten) tutoriellen System durchgeführten Studien weisen signifikant positive Ergebnisse auf. Einzelne Studien berichten allerdings negative oder nicht signifikante Ergebnisse. Lediglich drei Studien innerhalb des Fachs Mathematik inkludieren DPP. Zwei davon weisen signifikant positive Ergebnisse auf, eine dritte zwar ein positives, aber nicht signifikantes Ergebnis. Ähnliches zeigen die Ergebnisse einer Meta-Analyse von Cheung und Slavin (2013). Allgemein weist die Analyse zwar eine schwach positive Effektgröße hinsichtlich der Wirksamkeit digitaler Lernplattformen auf die Mathematikleistung auf, dabei variieren die Effekte zwischen den einbezogenen Studien jedoch stark. Die Autoren erklären dies unter anderem mit der unterschiedlichen wöchentlichen Nutzungsdauer der Lernplattformen. Auch Reinhold et al. (2018) können für ihre Studie zu dem Thema „Brüche“, in der eine eBook-Gruppe – dieses eBook erfüllt elementare Eigenschaften einer Lernplattform – mit einer Arbeitsbuchgruppe verglichen wird, signifikant bessere Ergebnisse der eBook-Gruppe gegenüber der Arbeitsbuchgruppe feststellen – dies allerdings nur für Lernende von Mittelschulen. Die Ergebnisse der Lernenden an Gymnasien verhalten sich annähernd gleich. Ähnlich scheinen in einer Studie von Beal et al. (2010) nur leistungsschwächere Schüler*innen im Fach Mathematik von dem Einsatz eines ITS zu profitieren – ihre leistungsstärkeren Mitschüler*innen allerdings nicht.

Die angesprochenen Potenziale digitaler Lernplattformen werden häufig auch von den Betreibern der Lernplattformen aufgegriffen: „Automatische Korrektur und personalisierte Rückmeldungen“, „Die adaptiven Übungen von bettermarks verhelfen Schülerinnen und Schülern zu besseren Leistungen in Mathematik und unterstützen Lehrkräfte, ihren Unterricht zu individualisieren.“ (Bettermarks GmbH, 2023), „Interaktivität und Adaption“ (Serlo Education, 2023), „[...] aussagekräftige Rückmeldungen und passende Hilfen“ (Meier, 2023). Ein Einsatz digitaler Lernplattformen sollte dennoch nur reflektiert und unter Berücksichtigung pädagogischer Prinzipien stattfinden (Harrass, 2007). Eine kritische Haltung gegenüber Lernplattformen erscheint als besonders notwendig unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Inhalte nicht immer, wenn nicht gar häufig, unpassend aufgearbeitet sind. Konkret ist damit gemeint, dass die

präsentierten Inhalte nicht zwangsläufig an die Lernpläne angepasst sind, sodass diese entweder nicht vollständig oder aber auch zu weitläufig sein können, andere Begrifflichkeiten verwenden oder gar fachlich inkorrekt sind (Harrass, 2007). Dies hat zum Grund, dass meist ein größerer Wert auf die optische Aufbereitung gelegt wird, was wiederum zu einer potenziellen kognitiven Überlastung führen kann (Benkert, 2001; Dillon & Gabbard, 1998; Harrass, 2007; Kuhn et al., 2017). Das heißt: Trotz der theoretischen Potenziale digitaler Lernplattformen – insbesondere in Form automatisierten Feedbacks – und der teilweise vielversprechenden Ergebnisse aus Meta-Analysen und einzelnen Studien sind Lernplattformen nicht „per se“ wirksam, sondern die Wirksamkeit abhängig von der passenden Gestaltung der Lernplattform und die Implementation in Lehr-Lern-Situation (Krauthausen, 2012; Reinhold et al., 2020). Durch die Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren (z. B. dem Vorwissen der Lernenden) gilt es in weiteren Studien zu klären, welche Lernplattform für welche Schülerschaft unter welchen Umständen lernförderlich ist.

Fest steht also, dass digitale Medien im Allgemeinen und Lernplattformen im Speziellen Kernprobleme schulischer Lehr-Lern-Prozesse (z. B. Differenzierung, Diagnostik und Förderung) nicht durch ihren bloßen Einsatz bewältigen können. Es gilt weiterhin pädagogische und (fach)didaktische Prinzipien zu berücksichtigen (Krauthausen, 2012). Aufgrund der Notwendigkeit, digitale Lernplattformen vor allem aus pädagogischer Sicht zu betrachten und weil die Wirksamkeit digitaler Lernplattformen insbesondere vom implementierten Feedback abhängig scheint, werden nachfolgend Erkenntnisse zu Feedback auf digitalen Lernplattformen zusammengefasst.

2.3.2.1 Feedback auf digitalen Lernplattformen

Lernplattformen bieten das Potenzial, durch direktes und kontinuierliches Feedback adaptives und individualisiertes Üben zu unterstützen (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2016; Euler & Holz, 1992; Heinen & Kerres, 2017; W. Holmes et al., 2018; Leutner, 2002; Schaumburg, 2017; van der Kleij et al., 2015). Dieses Potenzial wird besonders relevant bei Betrachtung des Umstandes, dass von Lehrkräften unter anderem gefordert wird, ihren Schüler*innen regelmäßig Feedback beispielsweise zu ihren Leistungen zugeben. Die Ausarbeitung von Feedback stellt neben anderen alltäglichen Aufgaben jedoch eine große zeitliche Belastung für Lehrkräfte dar (Andrade & Cizek, 2010). Darüber hinaus erhalten Lernende in Selbstlernphasen (wie z. B. Hausaufgaben) kein oder erst verzögert Feedback. Digitale Lernplattformen besitzen das Potenzial eben diese Lücke des fehlenden oder verzögerten Feedbacks zu schlie-

ßen. Bezogen auf dieses Potenzial bestätigen Meta-Analysen die Wirksamkeit digitalen Feedbacks gegenüber keinem Feedback (Azevedo & Bernard, 1995; Mertens et al., 2022). Feedback auf digitalen Lernplattformen kann also insbesondere in Selbstlernphasen (z. B. beim Erledigen von Hausaufgaben) von bedeutender Relevanz sein, denn in Situationen, in denen kein menschliche*r Tutor*in (z. B. eine Lehrkraft) anwesend ist, besteht nur durch den Einsatz digitaler Anwendungen (z. B. Lernplattformen) die Möglichkeit, direktes Feedback zu erhalten (Singh et al., 2011). Aufgrund dessen erfreuen sich Lernplattformen immer größerer Beliebtheit (Singh et al., 2011) und ermöglichen die Unterstützung der Lernenden in Abwesenheit menschlicher Tutor*innen (Lachner et al., 2020). Im Allgemeinen stellt sich Feedback auf Hausaufgaben (als Beispiel für Selbstlernphasen) als wirksam heraus (Walberg et al., 1984). Die Studienlage zu Feedback auf digitalen Lernplattformen vs. traditionellem Feedback scheint jedoch nicht eindeutig. Während eine Studie mit College Studierenden eines Physikkurses keinen Unterschied zwischen den zwei Bedingungen (Hausaufgaben unterstützt durch digitale Lernplattform vs. traditionelle Hausaufgabensituation) feststellt (Bonham et al., 2003), finden Mendicino et al. (2009) in ihrer Studie mit Fünftklässler*innen Hinweise auf eine Überlegenheit digital-gestützter Hausaufgabensituationen (mit direktem Feedback durch die Lernplattform) gegenüber traditioneller Hausaufgabensituationen (paper-pencil; Feedback am folgenden Tag) im Fach Mathematik. Allerdings äußern Singh et al. (2011) Kritik an der Methodik der Studie ihrer Kollegen und reagieren in Form einer adaptierten Studie. Dabei wird eine Versuchsgruppe, die direktes Feedback einer Lernplattform erhält, mit einer Gruppe, die durch kein Feedback der Lernplattform unterstützt wird, verglichen. Für beide Gruppe erfolgt vor Durchführung eines Leistungstests zum Verständnis geometrischer Inhalte eine Besprechung ausgewählter Probleme mit der Lehrkraft. Die Analysen zeigen, dass beide Gruppen von der Intervention profitierten, die Gruppe, die direktes Feedback durch die Lernplattform erhält, jedoch stärker.

Dass sich nicht nur der Vergleich zwischen „Feedback“ und „keinem Feedback“ lohnt, zeigt die Betrachtung der Wirksamkeit verschiedener Kategorien von Lernplattformen. So sind ITS und DPP hinsichtlich der Wirksamkeit vor allem aufgrund der höheren Komplexität des Feedbacks überlegen. Dabei betonen Reinhold et al. (2020) das Potenzial digitaler Lernplattformen im Allgemeinen und ITS im Speziellen insbesondere für die Bruchrechnung und begründen dies mit der breiten Forschung hinsichtlich bekannter Schülerfehler beim Umgang mit Bruchzahlen (vgl. Kapitel 1.1). So kann das Feedback auf digitalen Lernplattformen entsprechend dieser „typischen“ Schülerfehler komplex programmiert werden.

Wie gezeigt, kann Feedback auf digitalen Lernplattformen Schüler*innen besonders in Selbstlernphasen, z. B. beim Erledigen von Hausaufgaben, unterstützen. Diesbezüglich bieten Lernplattformen das Potenzial, die Lücke des fehlenden oder verzögerten Feedbacks zu schließen und so beispielsweise den Aufbau von Fehlvorstellungen, wie sie auch im Zusammenhang mit der Bruchrechnung auftreten (vgl. Kapitel 1.1), zu vermeiden (Reinhold et al., 2020). Allerdings ist über Feedback im Allgemeinen, aber vor allem über Feedback auf digitalen Lernplattformen noch zu wenig bekannt. Daher beleuchtet Kapitel 3 dieser Arbeit lerntheoretische Erkenntnisse zum Feedback im Allgemeinen, d. h. aus Studien mit analogen sowie digitalem Design vor dem Hintergrund der Frage, ob diese Erkenntnisse auf Feedback auf digitalen Lernplattformen übertragbar sind. Zunächst sollen jedoch empirische Erkenntnisse zur Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung eingehender betrachtet werden.

2.3.2.2 Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens (zur Bruchrechnung) durch digitale Lernplattformen

Wie in Kapitel 1.2 dargelegt, lernen Schüler*innen den Umgang mit Bruchzahlen vollumfänglich und nachhaltiger, wenn sowohl konzeptuelles („Wissen, warum“) als auch prozedurales Wissen („Wissen, wie“) zur Bruchrechnung gefördert wird. Inwiefern digitale Lernplattformen beide Wissensfacetten fördern können, ist noch nicht abschließend geklärt. Um unter anderem dieser Frage bezüglich der potenziellen Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung nachzugehen, analysierten Thurm und Graewert (2022) Aufgaben auf drei ausgewählten Mathematik-Lernplattformen (*Anton*, *bettermarks*, *Mathegym*) anhand eines Kodierschemas. Untersucht wurde unter anderem auch Aufgaben innerhalb des Themengebiets „Multiplikation von Brüchen“. Die Analyse ergibt, dass die Aufgaben häufig allein Potenzial zur Förderung und zum Aufbau von Faktenwissen und Fertigkeiten aufweisen. Konzeptuelles Wissen und/oder das Verstehen von Visualisierungen mathematischer Zusammenhänge werden hingegen zur Aufgabenbearbeitung nicht verlangt und demnach auch nicht gefördert. Die Autor*innen kommen daher zu dem Fazit, dass „ein produktives Üben im Sinne der Kombination von automatisierenden, reflektierenden und entdeckenden Tätigkeiten [...] nicht realisiert [wird]“ (Thurm & Graewert 2022). Auch im Rahmen einer eigenen Aufgabenanalyse der Lernplattform *bettermarks* zeigt sich die Überlegenheit bezogen auf die Anzahl an Aufgaben, die prozedurales Wissen zur Bruchrechnung fördern. Zwar stehen durchaus Aufgaben zur Verfügung, die potenziell konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung fördern, jedoch in einem deutlich geringeren Anteil als Aufgaben zur potenziellen Förderung prozeduralen Wissens (Altenburger & Besser, 2023). Zwar lassen sich diese Ergebnisse nicht verallgemeinern, da sich die Analyse

nur auf eine exemplarisch ausgewählte Lernplattform und einen einzelnen mathematischen Inhalt bezieht, dennoch scheinen – auch in Verbindung mit den Ergebnissen von Thurm und Graewert (2022) – Aufgaben auf Lernplattformen größeres Potenzial zu besitzen, prozedurales Wissen zu fördern. Entgegen diesen theoretischen Analysen zeigen die Meta-Analysen von van der Kleij et al. (2015) sowie von Mertens et al. (2022), die hinsichtlich des Lernerfolgs zwischen „lower-order learning outcomes“ (= prozedurales Wissen) und „higher-order learning outcomes“ (= „application of conceptual knowledge“; S. 1747) unterscheiden, dass Lernplattformen sowohl prozedurales als auch konzeptuelles Wissen fördern können. Die Wirksamkeit hinsichtlich der Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens ist jedoch abhängig von der Komplexität des implementierten Feedbacks. Genauere Ausführungen zu den Differenzierungsmöglichkeiten von Feedback hinsichtlich der Komplexität sowie zu dem Einfluss unterschiedlich komplexer Feedbackarten auf die Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens sind in Kapitel 3.2.1 zu finden. Unterstützt werden die Ergebnisse der Meta-Analysen durch eine Studie von Reinhold et al. (2020). Im Rahmen ihrer Studie setzen Reinhold et al. (2020) ein eBook ein, welches den in dieser Arbeit ausgearbeiteten Charakteristika einer Lernplattform stark ähnelt und Aufgaben zur potenziellen Förderung konzeptuellen sowie prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung bereitstellt. Die Ergebnisse zeigen eine bessere Förderung des konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung leistungsschwacher Sechstklässler*innen durch das digitale Buch nach der Implementation in den Unterricht im Vergleich zu traditionellen Lehrmethoden. Für leistungsstarke Schüler*innen stellt sich dieser Effekt allerdings nicht ein. Dies lässt sich vermutlich auf das implementierte Feedback zurückführen, welches laut aktuellen Erkenntnissen besonders für leistungsschwache Lernende wirksam ist (für mehr zum Einflussfaktor des Vorwissens vgl. Kapitel 3.3.1). Digitale Lernplattformen scheinen also besonders Potenzial hinsichtlich der Förderung prozeduralen Wissens zu haben (Petko, 2020). Aber auch konzeptuelles Wissen kann bei richtiger Gestaltung der Lernplattform (unter anderem bezüglich der Aufgabeninhalte und des Feedbacks), durch das Arbeiten mit einer Lernplattform gefördert werden.

Zusammenfassung

Aufgrund der Entwicklungen in Bezug auf die Weiterverbreitung digitaler Medien in der Lebenswelt von Schüler*innen sehen sich bildungspolitische Entscheidungstragende der Diskussion ausgesetzt, die Digitalisierung in Schule voranzutreiben, denn digitale Medien bieten nicht nur das Potenzial, den Lernprozess von Schüler*innen zu unterstützen, sondern darüber hinaus ist es für Schüler*innen wichtig, Kompetenzen im Umgang mit digitalen Medien zu entwickeln (Kapitel 2).

Besonders aufgrund des zeitweise eintretenden Distanzunterrichts rücken Lernplattformen als eine Kategorie digitaler Medien in den Fokus zur Unterstützung von Lehr-Lern-Prozessen. Die Wirksamkeit von Lernplattformen ist unter anderem durch Meta-Analysen belegt. Die Studienergebnisse erweisen sich allerdings als heterogen (Kapitel 2.3.2). Die Wirksamkeit digitaler Lernplattformen, welche sich auch für Selbstlernphasen ergibt, wird vor allem auf das automatisierte Feedback zurückgeführt (Kapitel 2.3.2.1).

Die Frage, ob und inwiefern konzeptuelles und prozedurales Wissen zur Bruchrechnung durch digitale Lernplattformen gefördert werden können, ist aufgrund eines Mangels an empirischen Studien nicht final beantwortbar. Digitale Lernplattformen scheinen jedoch Potenzial zu besitzen, konzeptuelles sowie prozedurales Wissen zur Bruchrechnung zu fördern. Bei Betrachtung der Aufgaben auf Lernplattformen scheint allerdings ein Fokus auf der Förderung prozeduralen Wissens (zur Bruchrechnung) zu liegen (Kapitel 2.3.2.2).

Begriffserklärungen

Digitale Medien: Der Begriff der digitalen Medien unterliegt einem breiten und nicht allgemeinem Begriffsverständnis. Digitale Medien sind Vermittler zwischen Sendendem und Empfangenden und erlauben eine zeit- und ortsunabhängige Interaktivität, wodurch neue Kommunikationsformen entstehen. Im Vergleich zu analogen Medien bieten digitale Medien vor allem den Vorteil einer (fast) unbegrenzten Informationsspeicherung und -vermittlung.

Lernplattformen: Digitale Lernplattformen stellen webbasiert Informationen zum Lernstoff, zugehörige Aufgaben und/oder Feedback zu den Aufgaben bereit. Die Eingabe von Antworten führt zu einer Interaktion zwischen Lernplattform und Lernenden. Lernplattformen lassen sich unter anderem in DPP und (intelligente) tutorielle Systeme unterscheiden.

Zusammenhänge zentraler Variablen

Inwiefern Einstellungen und Kompetenzen bezüglich digitaler Medien zentrale Variablen dieser Arbeit beeinflussen, wird in der Zusammenfassung von Kapitel 3 dargestellt.

3 Zur Frage um die Wirksamkeit von Feedback

Überblick des Kapitels

Zentrales Ziel des Kapitels ist die Schaffung einer Grundlage zur Bewertung von Feedback hinsichtlich dessen Wirksamkeit sowie das Wissen um mögliche Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit von Feedback. Dafür findet ausgehend von dem Wissen um die Möglichkeiten zur Gestaltung von Feedback in digitalen Lernplattformen und dem Potenzial von Feedback Lehr-Lern-Situation effektiv(er) zu gestalten, nachfolgend eine Auseinandersetzung mit der Diskussion um zentrale Ideen des Konzepts „Feedback“ statt. Beginnend mit einer Begriffsgrundlegung (3.1) wird anschließend die Komplexität der Studienlage zum Einfluss von Feedback auf die Leistung von Schüler*innen dargelegt und dabei die Relevanz von Feedback unter anderem unter Bezugnahme des formativen Assessments diskutiert (3.2). Aufbauend auf den Erkenntnissen zur Wirksamkeit von Feedback werden verschiedene Gestaltungsmöglichkeiten als Erklärungsansatz für differierende Studienergebnisse thematisiert. Die Gestaltungsmöglichkeiten beziehen sich dabei zum einen auf die Komplexität der Feedbackinformationen (3.2.1) und zum anderen auf den Zeitpunkt, zu dem Feedback den Lernenden präsentiert wird (3.2.2). Um darauf einzugehen, wieso Feedback, welches aus lerntheoretischer Perspektive als effektiv gestaltet gilt, bei Schüler*innen dennoch nicht zu einer Leistungsentwicklung führt, wird auf Eigenschaften von Lernenden eingegangen, die die Lernwirksamkeit beeinflussen (können) (3.3). Zu diesen Determinanten zählen das Vorwissen der Lernenden (3.3.1) sowie die Wahrnehmung des Feedbacks durch die Lernenden (3.3.2). Eine weitere relevante Variable zur Entfaltung der Wirksamkeit von Feedback ist dessen eigentlichen Nutzung. Die Relevanz der Feedbacknutzung wird in Kapitel 3.4 behandelt sowie Gründe hinsichtlich einer (Nicht-)Nutzung von Feedback kategorisiert nach Lernendeneigenschaften und Feedbackgestaltung (3.4.1) dargelegt. Abschließend erfolgt eine Auseinandersetzung mit der potenziellen Förderung emotionaler und motivationaler Variablen durch den Einsatz (digitalen) Feedbacks in Lehr-Lern-Situationen (3.5).

3.1 Begriffsdefinition

Feedback wird in (bildungswissenschaftlichen) Abhandlungen nicht immer einheitlich definiert. Eine Auflistung verschiedener Feedbackdefinitionen liefert die Arbeit von Lipnevich und Panadero (2021). Anhand dieser verschiedenen Definitionen von Feedback lässt sich eine Entwicklung hinsichtlich der Rolle der Lernenden von passiven empfangenden Personen hinzu aktiv am Feedbackprozess beteiligten Interagierenden ausmachen (Lui & Andrade, 2022; van

der Kleij & Lipnevich, 2020). So gilt Feedback zur vorherrschenden Zeit des Behaviorismus als Verstärkung richtiger Antworten (van der Kleij & Lipnevich, 2020). Dieses Verständnis von Feedback löst sich jedoch nach und nach auf und Feedback wird als Information zum Korrigieren von Fehlern angesehen und dementsprechend konstruiert (Mory, 2004). Feedback bietet demnach „alle Informationen, die einer Person nach dem oder auch beim Bearbeiten von Lernaufgaben über ihren aktuellen Lern- oder/und Leistungsstand angeboten werden, mit dem Ziel, dass diese Informationen für die Regulation des Lernprozesses in Richtung erwünschter Ziele genutzt werden“ (Narciss, 2018). Das primäre Ziel von Feedback liegt demnach in der Anpassung des Denkens und/oder Verhaltens des/der Empfangenden meist zum Zweck der Leistungsverbesserung (Shute, 2008). Zur Erreichung dieses Ziels ist die Identifizierung einer Lücke zwischen dem aktuellen Lernzustand und dem Lernziel notwendig, um letztendlich die Lücke zu schließen (Ramaprasad, 1983; Sadler, 1989). Feedback liefert Informationen über diese Lücke und/oder über Strategien, diese zu schließen (Narciss, 2006). Ramaprasad (1983) grenzt Feedback gegenüber einer „einfachen“ Information durch die Nutzung von Informationen zum Schließen eben jener Lücke ab. Dadurch rücken der Lernende und der Umgang mit Feedback stärker in den Fokus (van der Kleij & Lipnevich, 2020) und nicht jede Information über den Leistungsstand oder das Verhalten kann als Feedback eingeordnet werden, sondern es bedarf der Nutzung dieser Information zum Erreichen eines Ziels.

Wie diese Informationen übermittelt werden bzw. wer diese Informationen übermittelt, scheint unterschiedlich definiert zu werden. Kluger und DeNisi (1996) beispielsweise bleiben sehr vage und definieren Feedback als Information über eine Leistung, übermittelt durch eine externe Instanz. Diese Definition suggeriert die Notwendigkeit einer äußeren Instanz. Butler und Winne (1995) hingegen betonen, dass Feedback nicht zwangsläufig von außen kommen muss, sondern im Sinne der Selbstregulation auch aus einem selbst heraus funktioniert. Dies findet sich auch in der Definition von Hattie und Timperley (2007) wieder, die von Feedback als „information provided by an agent (e.g., teacher, peer, book, parent, self, experience) regarding aspects of one’s performance or understanding“ (S. 81) sprechen. Die Information kann demnach von außen („teacher“, „peer“, „book“) oder von innen („self“, „experience“) zur Verfügung gestellt bzw. abgerufen werden. Als externe Instanzen können auch digitale Lernplattformen gelten (Lipnevich & Panadero, 2021; Narciss, 2006).

Narciss (2006) prägt im Zusammenhang mit Feedback einer externen Instanz den Begriff „informatives Feedback“ und grenzt dieses vom internen Feedback (vgl. beispielsweise Butler &

Winne, 1995) ab. Neben dem informativen Feedback, welches Informationen zu einer Aufgabenbearbeitung oder dem Leistungsstand liefert, kann Feedback auch eine motivierende Funktion einnehmen. Durch beispielsweise Belohnungen und Bestrafungen oder dem Feedback zu Lernfortschritten sollen Ergebnisse bewertet werden (Shute, 2008). Feedback wirkt nämlich nicht nur auf die Leistung der empfangenden Person, sondern kann auch Informationen zu „beliefs about self and tasks“ (Winne & Butler, 1994, S. 5740) enthalten und demnach motivationale und emotionale Variablen beeinflussen, die wiederum in Zusammenhang mit der Leistung stehen (vgl. Kapitel 3.5) (Mertens et al., 2022).

Formatives und summatives Feedback

Verdeutlichen lässt sich die Relevanz von Feedback für den Lehr-Lern-Prozess bei Betrachtung des formativen Assessments (u. a. auch assessment for learning genannt), für welches Feedback eine zentrale Rolle spielt (Black & Wiliam, 2009). Formatives Assessment besteht aus den zwei Hauptkomponenten „formative Diagnostik“ und „formatives Feedback“. Ziel formativen Assessments ist die fortlaufende Sammlung „diagnostische[r] Informationen zur Lehrentwicklung der Lernenden [...] (formative Diagnostik) und [die Nutzung] dieser Informationen [...], um Unterrichtsprozesse anzupassen und/oder den Lernenden Rückmeldung zu geben und sie damit zu befähigen, ihre individuellen Lernprozesse zu optimieren (formatives Feedback)“ (Bürgermeister & Saalbach, 2018). Wie aus Abbildung 12 hervorgeht, werden im Rahmen des formativen Assessments durch konkrete Zielformulierungen in einer ersten Phase Erwartungen an die Lernenden geklärt, d. h. Ziele formuliert. Nach der Aufgabenbearbeitung werden die Schülerantworten gesammelt (Phase 2), um diese Antworten anschließend zu analysieren und interpretieren (Phase 3). Auf Grundlage dieser Analysen geben Lehrende den Lernenden Feedback (Phase 4), woraufhin die Lehrenden ihren Unterricht entsprechend den Lücken der Lernenden und die Lernenden ihr Lernverhalten anpassen (Phase 5). Idealerweise beginnt dieser Zyklus anschließend wieder bei Phase 1 (Veugen et al., 2021). Meta-Analysen und Einzelstudien stellen für formatives Assessment im Allgemeinen und formatives Feedback im Speziellen bei passender Umsetzung eine hohe Lernwirksamkeit fest (Bangert-Drowns et al., 1991; Black & Wiliam, 1998; Dunn & Mulvenon, 2009; Hattie & Timperley, 2007; Kingston & Nash, 2011; Kluger & DeNisi, 1996; Shute, 2008).

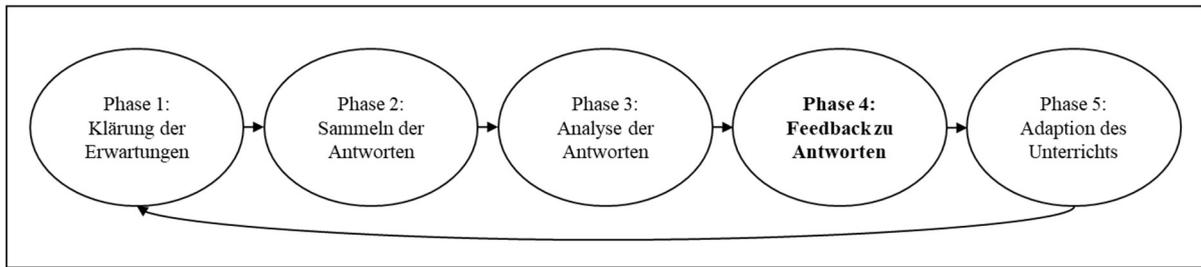


Abbildung 12: Phasen des formativen Assessments, eigene Darstellung nach Veugen et al., 2021

Feedback im Sinne des formativen Assessments geschieht dem Regelkreislauf folgend kontinuierlich im Lernprozess und hat die Adaption des Wissens und/oder Verhaltens der Lernenden zum Ziel (Sadler, 1989; Shute, 2008), indem es den Lernenden Informationen darüber liefert, wie sie die Diskrepanz zwischen aktuellem Verständnis und dem Lernziel verringern (Andrade & Cizek, 2010). Diese Informationen sollen folgende Aspekte abdecken (Grotjahn & Kleppin, 2017):

1. Rückmeldung eines ermittelten Kompetenzniveaus
2. Rückmeldung zu spezifischen Schwächen und/oder Stärken der Lernenden – mit Hinweisen zur Weiterarbeit
3. Lob und Hervorheben von Fortschritten
4. Vorstellen eines korrekten Modells
5. Hilfen für die Überarbeitung
6. Rückmeldung in Form einer verbalen Bewertung oder einer Ziffernote
7. Anstoß und Aktivitäten zum Weiterlernen

Allerdings reicht die Erfüllung der genannten Designkriterien für manche Forschende nicht aus, um Feedback als formativ zu klassifizieren. Der Umgang der empfangenden Person ist für diese Forschenden entscheidend. Erst wenn die Person das Feedback nutzt, um ihr Verhalten anzupassen, gilt es als formativ (Black & Wiliam, 2009). Die zusätzliche Bedingung der Feedbacknutzung erscheint unter den Gesichtspunkten der häufig fehlenden Möglichkeiten zur Umsetzung des Feedbacks (Jonsson & Panadero, 2018) sowie der Schwierigkeit, Feedback als Unterstützung zu erkennen (Tunstall & Gsipps, 1996), als durchaus sinnvoll.

Dem formativen Assessment steht das summative Assessment entgegen. Formatives und summatives Feedback unterscheiden sich insbesondere in ihrer Funktion (Yorke, 2003). Summatives Feedback verfolgt den Zweck einer abschließenden Bewertung einer Leistung (Sadler, 1989) und gibt eine Übersicht darüber, was gelernt wurde (Burns et al., 2010), bzw. über den aktuellen Lernstand (Kuklick & Lindner, 2023). Lernende erhalten in diesem Sinne Feedback

meist nach einer Prüfungssituation oder festgelegten Anzahl von Aufgaben beispielsweise in Form von Noten oder zusammenfassenden Punktzahlen (Duss, 2020). Aber auch kontinuierliches Feedback beispielsweise über die Anzahl richtig gelöster Aufgaben, wie es häufiger in digitalen Lernplattformen umgesetzt ist, gilt als summatives Feedback (Narciss, 2018). Im Vergleich zum formativen gilt summatives Feedback als weniger motivations- und leistungsförderlich (Grotjahn & Kleppin, 2017).

3.2 Zur Wirksamkeit von Feedback und internalen Determinanten

Schon in Kapitel 2 wird das Potenzial und die Wirksamkeit von Feedback auf digitalen Lernplattformen als Beitrag zu einem individualisiertem und lernförderlichem Unterricht angesprochen. Feststellen lässt sich, dass Feedback unabhängig vom Einsatz digitalen oder „traditionellem“ analogen Feedback als einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf den Lernprozess gilt (z. B. Azevedo & Bernard, 1995; Hattie, 2009; Mertens et al., 2022; Wisniewski et al., 2019). Verschiedene Metaanalysen zeigen die Überlegenheit von Feedback gegenüber keinem Feedback (Bangert-Drowns et al., 1991; Butler & Winne 1995; Kluger & DeNisi, 1996; Narciss 2006; Shute 2008). Für das Fach Mathematik scheinen die Effektstärke gegenüber anderen Lernfeldern wie Naturwissenschaften besonders stark zu sein (van der Kleij et al., 2015). Bemerkenswert ist die große Menge an Studien, die Feedback zu einem der besten erforschten Einflussfaktoren macht (Narciss, 2018). Dass Feedback in einem besonderen Maße lernförderlich sein kann, ist demnach unumstritten. Allerdings variieren die Studienergebnisse stark (Azevedo & Bernard, 1995; Bangert-Drowns et al., 1991; Hattie & Timperley, 2007; Mertens et al., 2022; Wisniewski et al., 2020). Diese Variation in den Befunden lässt sich unter anderem auf die vielfältigen Möglichkeiten, Feedback zu gestalten, zurückführen (Mertens et al., 2022; Narciss, 2018; Zierer, 2022). Feedback ist also nicht „per se“ lernförderlich. Forschungsbeiträge stellen sich demnach nicht mehr die Frage, ob Feedback wirksam sein kann, sondern wie Feedback möglichst effektiv gestaltet werden kann, um Schüler*innen in ihrem Lernen zu unterstützen. Auch diese Arbeit möchte einen Beitrag bezüglich der Frage um die wirksame Gestaltung von Feedback liefern. Dazu werden nachfolgend als Vorbereitung auf die Interventionsstudie verschiedene Differenzierungsmöglichkeiten von Feedback, die sich wiederholt im theoretischen sowie empirischen Diskurs wiederfinden, dargestellt und dabei Tendenzen lernwirksamer Gestaltungsmöglichkeiten von Feedback herausgearbeitet. Differenziert wird zwischen unterschiedlich komplexen Arten von Feedback sowie dem direkten und verzögerten Feedback. Die nachfolgenden Ausführungen dienen also in Bezug zur Interventionsstudie als wichtige Grundlage zur Analyse des eingesetzten Feedbackdesigns, denn Ziel ist es, eine Gruppe, die

Feedback nah an einer Selbstlernphase erhält und eine zweite Gruppe, die mit aus lerntheoretischer Sicht möglichst wirksam gestaltetem Feedback arbeitet, zu vergleichen. Aus diesem Grund wird in nachfolgenden Ausführungen dargelegt, wie Feedback möglichst lernwirksam eingesetzt und gestaltet werden kann. Dabei gilt jedoch zu betonen, dass die Lernwirksamkeit einer Feedbackart auch von individuellen Bedürfnissen und Eigenschaften der Lernenden abhängt, wie in Kapitel 3.3 dargestellt und daher nicht verallgemeinert werden kann, dennoch lassen sich Tendenzen hinsichtlich der Wirksamkeit zwischen unterschiedlich gestaltetem Feedback herausarbeiten.

3.2.1 *Komplexität von Feedback*

Lange wurde Feedback als einfache Information, ob eine Antwort richtig oder falsch ist, gesehen; das sogenannte „verification feedback“. Dass Feedback weit ausführlicher sein kann, greifen beispielsweise Kulhavy und Stock (1989) in ihrem Feedbackmodell auf. Neben der „verification“ Komponente schreiben sie Feedback auch eine „elaboration“ Komponente zu. Mittlerweile wird Feedback häufig danach differenziert, wie elaboriert, d. h. wie komplex es ist. Summatives Feedback gestaltet sich beispielsweise generell als weniger komplex im Vergleich zu formativem Feedback. Für Morrison et al. (1995) gilt Feedback als komplex, wenn es von den Lernenden „additional engagement [...] through either reading or responding“ (S. 32) verlangt. Was genau komplexes Feedback im Gegensatz zu einfachem Feedback ausmacht, wird nachfolgend anhand der Kategorisierungen von Narciss (2006) und Shute (2008) dargelegt. Beide Autorinnen unterscheiden zwischen einfachen und elaborierten – den komplexen – Feedbackarten. Den Unterschied zwischen einfachen und elaborierten Feedbackarten illustriert Abbildung 13. Alle der nachfolgend dargestellten einfachen Feedbackarten finden sich im Feedbackdesign der Interventionsstudie wieder (vgl. dazu Abschnitt C, Kapitel 4.2) (Narciss, 2006, S. 19; Shute, 2008, S. 160):

- Knowledge of performance (KP): summatives Feedback nach einer festgelegten Anzahl an Aufgaben
- Knowledge of result (KR): Information über die Korrektheit (richtig/falsch) oder den Grad an der Korrektheit (z. B. 4/5) einer Antwort; auch: knowledge of response, (simple) verification, confirmation
- Knowledge of correct response (KCR): Rückmeldung über die korrekte Antwort zu einer Aufgabe
- Multiple try feedback (MTF): Information über eine falsche Antwort und die Möglichkeit eines oder mehrerer Lösungsversuche; auch: answer until correct (AUC), Try-again
- Error flagging: Information darüber, was an einer Antwort inkorrekt ist, ohne die richtige Antwort zu geben

Für die einfachen Feedbackarten herrscht ein allgemeiner Konsens in der Gestaltung des Feedbacks, auch wenn teilweise unterschiedliche Begrifflichkeiten Verwendung finden. Für elaboriertes Feedback gilt diese Einigkeit allerdings nicht. Elaboriertes Feedback ist eine generelle Bezeichnung für Feedback, welches eine Erklärung dazu beinhaltet, wieso eine Antwort inkorrekt ist, unabhängig davon, ob die korrekte Antwort präsentiert wird oder nicht (Shute, 2008) oder den Lernenden Material zur Lösungsfindung zur Verfügung stellt (Dempsey et al., 1993). Es wird postuliert, dass sich elaboriertes Feedback, damit es als effektiv gilt, an drei Fragen orientieren soll: „Wohin gehst du?“ (feed up), „Wie kommst du voran?“ (feed back) und „Wohin geht es danach?“ (feed forward) (Hattie & Timperley, 2007; Zierer, 2022). Das „feed up“ zeigt den Lernenden klare Zielvorstellungen und zu erreichende Kriterien auf. Informationen über die Diskrepanz zwischen eben diesen Zielvorstellungen und dem aktuellen Lernstand beinhaltet das „feed back“. Wie diese Diskrepanz verringert werden kann, beantwortet das „feed forward“ (Hattie & Timperley, 2007).

Elaboriertes Feedback kann auf unterschiedliche Art gestaltet sein. Meist bilden die Feedbackarten KR oder KCR die Grundlage elaborierten Feedbacks und werden um weitere Informationen ergänzt (Jaehnig & Miller, 2007). Diese Informationen können vielfältig sein (Narciss, 2006; van der Kleij et al., 2015), was zur Folge hat, dass der Grad der Komplexität elaborierten Feedbacks in Studien sehr unterschiedlich ausfällt (Shute, 2008). Mit dem Ziel der Differenzierung elaborierten Feedbacks und der Vergleichbarkeit von Studienergebnissen entwickelten sich verschiedene Klassifikationsvorschläge für elaboriertes Feedback (z. B. Kulhavy & Stock, 1989; Mason & Bruning, 2001; Narciss, 2006; Shute, 2008). Zwei der prominentesten Beispiele sollen nachfolgend und als Vorbereitung zur Analyse des Feedbackdesigns der Interventionsstudie dargestellt werden. Die hervorgehobenen Feedbackkomponenten (fett gedruckt) lassen sich auch im Feedbackdesign der Interventionsstudie wiederfinden (vgl. Abschnitt C, Kapitel 4.2).

Narciss (2006) unternimmt einen Versuch, die prominentesten bereits existierenden Feedbackklassifikationen nach relevanten inhaltlichen Aspekten von Feedback zu gliedern (vgl. Tabelle 4). Die ersten drei Feedbackarten (KP, KR, KCR) können jeweils als Grundlage elaborierten Feedbacks gesehen werden, gelten aber nicht als komplex genug, um isoliert als elaboriert klassifiziert zu werden. Narciss (2006) betont die häufige Kombination mehrerer Feedbackkomponenten beim Design elaborierten Feedbacks.

Tabelle 4: Komponenten elaborierten Feedbacks nach Narciss (2006), S. 23

Bezeichnung	Beispiele	
Knowledge of performance (KP)	<ul style="list-style-type: none"> • 15 von 20 Aufgaben richtig 	
Knowledge of result (KR)	<ul style="list-style-type: none"> • Falsch/richtig 	
Knowledge of correct result (KCR)	<ul style="list-style-type: none"> • Angabe der korrekten Lösung 	
Elaborierte Komponenten	Knowledge on task constraints (KTC)	Hinweise z. B. auf <ul style="list-style-type: none"> • Bearbeitungsregeln
	Knowledge about concepts (KC)	<ul style="list-style-type: none"> • Beispiele für Begriffe • Erklärungen zu Begriffen
	Knowledge about mistakes (KM)	<ul style="list-style-type: none"> • Ort der Fehler/des Fehlers • Art der Fehler/des Fehlers
	Knowledge on how to proceed (KH)	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlerspezifische Korrekturhinweise • Lösungsbeispiele
	Knowledge on meta-cognition (KMC)	<ul style="list-style-type: none"> • Hinweise auf meta-kognitive Strategien • Meta-kognitive Leitfragen

Auch Shute (2008) macht einen Vorschlag zur Klassifizierung von elaboriertem Feedback und differenziert verschiedene Feedbackarten hinsichtlich der Komplexität der enthaltenen Informationen (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Feedbackkategorien geordnet nach Komplexität nach Shute (2008), S. 160

Feedbackart	Beschreibung
Attribute isolation	Feedback, das Informationen zu zentralen Merkmalen des Lernziels enthält.
Topic contingent	Feedback, das den Lernenden mit Informationen über das aktuell bearbeitete Zielthema versorgt. Es kann eine einfache Wiederholung des Lernstoffs beinhalten.
Response contingent	Feedback, das sich auf die spezifische Antwort des Lernenden konzentriert. Es kann beschreiben, warum die falsche Antwort falsch ist und warum die richtige Antwort richtig ist. Dabei wird keine formale Fehleranalyse verwendet.
Hints/cues/prompts (Hilfen)	Feedback, das den Lernenden in die richtige Richtung lenkt, z. B. ein strategischer Hinweis, was als Nächstes zu tun ist, oder ein Lösungsbeispiel oder eine Demonstration. Vermeidet die explizite Angabe der richtigen Antwort.
Bugs/misconceptions	Feedback, das eine Fehleranalyse und -diagnose erfordert. Es liefert Informationen über die spezifischen Fehler oder Missverständnisse des Lernenden (z. B. was falsch ist und warum).
Informative tutoring	Die elaborierteste Form des Feedbacks (Narciss & Huth, 2004), die Rückmeldungen zur Überprüfung, Fehlermeldungen und strategische Hinweise zum weiteren Vorgehen enthält. Die richtige Antwort wird normalerweise nicht gegeben.

Berechne $\frac{1}{6} + \frac{3}{4}$.

Das ist nicht korrekt. (4)

Beachte, dass du die Brüche auf den gleichen Nenner bringen musst, bevor du sie addierst. Dann addierst du die Zähler und die Nenner bleiben gleich. (5)

$\frac{1}{6} + \frac{3}{4} = \frac{4}{10}$ (1)

Die richtige Lösung lautet: $\frac{11}{12}$ (2)

$\frac{12}{15}$ (3)
Aufgaben richtig

Abbildung 13: Beispielhafte Aufgabe inklusive verschiedener Feedbackarten zur Unterscheidung einfachen (1-4) und elaborierten Feedbackkomponenten (5), (1) Error Flagging, (2) KCR, (3) KP, (4) KR, (5) KH (nach Narciss, 2006) bzw. Bugs/misconceptions (nach Shute, 2008)

Hilfen als Teil von Feedback:

Vorgreifend auf das Feedbackdesign der Interventionsstudie soll darauf verwiesen werden, dass Hilfen als Feedback angesehen werden können. So nennt beispielsweise Shute (2008) in ihrer Klassifizierung Hilfen (vgl. Tabelle 5 „Hints/cues/prompts“) explizit als eine von sechs Arten elaborierten Feedbacks. Diese Art impliziert beispielsweise Hinweise zum weiteren Verfahren (feed forward) oder Lösungsbeispiele. Analog zu Shute klassifiziert auch Narciss (2018) zusätzliche Hilfen als Feedback und ordnet Hilfen der Feedbackart „KH“ zu. Allgemein gesprochen enthalten Hilfen „Anweisungen, was gelernt werden soll und was der Lernende während des Lernprozesses tun soll“ (frei übersetzt nach Lysakowski & Walberg, 1982, S. 560). Besonders automatisierte Hilfen aus Lernplattformen besitzen durch die direkte Präsentation das Potenzial die Leistung von Schüler*innen zu steigern (McBroom et al., 2021). Ein Experiment von Singh et al. (2011), in dem Achtklässler*innen mit einer digitalen Lernplattform an Aufgaben zum Satz des Pythagoras arbeiten, zeigt die Wirksamkeit von Hilfen. Während eine Gruppe das Feedback „KCR“ präsentiert bekommt, wird einer zweiten Gruppe zusätzlich drei bis vier Hilfen zur Verfügung gestellt. Analysen ergeben einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen in der Nachtestleistung mit einer Effektstärke von .54. Eine Replikation des Experiments mit einer Variation des mathematischen Inhalts – für dieses zweite Experiment befassen sich die Lernenden mit exponentiellem und linearem Wachstum – bestätigten das Ergebnis aus Experiment 1.

Allerdings entscheidet die konkrete Umsetzung der Hilfen, ob es zu einer Leistungssteigerung kommt oder eben nicht, bzw. wie hoch diese ausfällt. Auf die Gestaltung von Hilfen sollte daher ein besonderer Wert gelegt werden. Für eine hohe Effektivität sollten Hilfen die empfangende

Person auf „task-motivation processes“ aufmerksam machen und Informationen bezüglich „erroneous hypothesis“ liefern (Hattie, 1999). Außerdem erscheinen Hilfen als besonders lernwirksam, wenn die Informationen für den Lernenden klar und bedeutungsvoll sind sowie verschiedene Erklärungsansätze verfolgen. Neben der Gestaltung ist die konkrete Anzahl an angebotenen Hilfen entscheidend. Dabei gilt nicht „je mehr, desto besser“, um eine Überforderung der Schüler*innen zu vermeiden. Wie viele Hilfen angemessen sind, kann allerdings an keiner konkreten Zahl festgehalten werden. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Hilfen alle für den Lösungsprozess relevanten Informationen enthalten (Lysakowski & Walberg, 1982).

Zur Wirksamkeit unterschiedlich komplexer Feedbackarten:

Die Ergebnisse bezüglich der Wirksamkeit unterschiedlich komplexer Feedbackarten verhalten sich inkonsistent (Shute, 2008). Es scheint jedoch eine Tendenz zur Überlegenheit elaborierten Feedbacks gegenüber einfachen Feedbackarten hinsichtlich der Leistungssteigerung vorzuliegen. So berichten mehrere Studien von einem positiven Effekt auf die Leistung, wenn eine elaborierte Feedbackart anstatt einer einfachen eingesetzt wird (Jerram et al., 1988; Krause et al., 2009; Morrison et al., 1995; Narciss & Huth, 2006; Pridemore & Klein, 1995). Allerdings kommen andere Studien zu gegenteiligen Ergebnissen (Kulhavy et al., 1985). Hattie und Timperley (2007) argumentieren hinsichtlich der Überlegenheit elaborierten Feedbacks gegenüber einfachen Formen (wie z. B. KR) mit fehlenden Informationen innerhalb einfachen Feedbacks zur erfolgreichen Adaption des Verhaltens und damit der Schließung der Lücke zwischen aktuellem Wissen und dem Lernziel. Elaboriertem Feedback wiederum wird eine unterstützende Funktion bei der Aufgabenbearbeitung zugesprochen. Besonders beim Festigen/Üben von Regeln, welches beim Lehren und Lernen von Mathematik eine wichtige Rolle einnimmt, scheint elaboriertes Feedback im Vergleich zu einfacheren Feedbackarten wirksamer zu sein (Mory, 2004). Dass elaboriertes Feedback einfachem Feedback (beim Lernen von mathematischen Inhalten) überlegen ist, zeigt auch eine Studie von Elawar und Corno (1985). In ihrer Studie werden Mathematiklehrkräfte in einer Strategie zur Gestaltung von schriftlichen elaborierten Feedbacks in Bezug auf Hausaufgaben, welches sich auf spezifische inhaltliche Fehler und Fehler in der Bearbeitungsstrategie konzentriert und ebenso Informationen zum weiteren Vorgehen enthält (= elaboriertes Feedback), geschult. Andere Mathematiklehrkräfte einer Kontrollgruppe benoten die Hausaufgaben ohne zusätzliches Feedback (= einfaches Feedback). Analysen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen mit besserer Leistung der elaborierten Feedbackgruppe. Weitere Studien belegen den positiven Effekt elaborierten Feedbacks mit Bezug zum Lernen mathematischer Inhalte (Krause et al., 2009; Rakoczy et al., 2008).

Harks et al. (2013) begründen die Wirksamkeit für das Fach Mathematik mit der Regelmäßigkeit mathematischer Verfahren. Dadurch können Fehler meist eindeutig identifiziert werden und die Ausarbeitung und Gestaltung von Feedback (wie beispielsweise konkrete Hilfen) im Vergleich zu anderen Fächern sollte aus theoretischer Perspektive einfacher und lernwirksamer umsetzbar sein. In einer eigenen Studie untersuchen Harks und Kollegen (2013) unter anderem den Einfluss prozessorientierten elaborierten Feedbacks im Vergleich zu Noten auf die Leistung. Analysen zeigen für die 146 Neuntklässler*innen zwar eine positivere Wirkung des elaborierten Feedbacks gegenüber der Noten-Gruppe, dieser Unterschied stellt sich jedoch nicht als signifikant heraus.

Auch beim Üben in digitalen Lernsettings ist die Studienlage nicht konsistent. Elaboriertes Feedback erweist sich jedoch in multiplen Studien einfacheren Feedbackarten als überlegen (Dresel & Haugwitz, 2008; Krause et al., 2009; Morrison et al., 1995; Pridemore & Klein, 1995). So zeigen beispielsweise die Ergebnisse einer Meta-Analyse von van der Kleij et al. (2015), dass sowohl elaboriertes Feedback als auch KR lernwirksam sein können, elaboriertes Feedback erzielt dabei aber größere Effektstärken. Besonders für Studien mit mathematischen Inhalten sind die Effektstärken groß. Ähnliches bestätigt auch eine Studie von Dresel und Haugwitz (2008) zum Arbeiten an mathematischen Aufgaben an einer digitalen Lernplattform zu verschiedenen Zeitpunkten eines Schuljahres. Elaboriertes Feedback erscheint als leistungsförderlicher als einfaches Feedback für die teilnehmenden Sechstklässler*innen. Die Ergebnisse einer Studie von Sleeman et al. (1989) vergleichen Feedback bezogen auf Algebraaufgaben, welches spezifisch auf individuelle Fehlereingaben eingeht mit Feedback, welches die korrekte Lösung sowie ein Lösungsbeispiel angibt. Beide Feedbackvarianten können als elaboriert eingeordnet werden und stellen sich als effektiver heraus im Vergleich zu keinem Feedback, keine der beiden Feedbackarten ist jedoch der anderen überlegen.

Unter Betrachtung prozeduralen Wissens als Indikator für die Leistung hat KR einen kleinen Effekt. Auf das konzeptuelle Wissen als Leistungsvariable kann bisher kein Effekt für KR festgestellt werden. Elaboriertes Feedback wiederum hat einen größeren Einfluss auf das konzeptuelle und einen mittleren auf das prozedurale Wissen. Daraus lässt sich schließen, dass „[...] the additional value of EF [= elaborated feedback] over KR or KCR is much more substantial for higher order learning outcomes than for lower order learning outcomes“ (van der Kleij et al. 2015, S. 496). Eine neuere Meta-Analyse von Mertens et al. (2022) differenziert ebenfalls zwischen konzeptuellem und prozeduralem Wissen als abhängige Leistungsvariablen. Die Ergebnisse zeigen die Überlegenheit elaborierten Feedbacks gegenüber einfachem Feedback (wie

KR) beim Erwerb prozeduralen Wissens. Dabei gilt, dass bei der fachunabhängigen Analyse sowohl elaboriertes als auch KR signifikante Ergebnisse erzielen. Unter Einbezug ausschließlich mathematikbezogener Studien ist der Effekt für KR allerdings nicht mehr signifikant. Für den Erwerb konzeptuellen Wissens mit Unterstützung einer digitalen Lernplattform zeichnet sich hinsichtlich der Ergebnisse ein anderes Bild. Fächerübergreifend bleibt elaboriertes Feedback anderen, weniger komplexen Feedbackarten weiterhin überlegen, weist allerdings eine geringere Effektstärke auf. Bezogen auf das Fach Mathematik haben weder elaboriertes noch KR einen Einfluss auf das konzeptuelle Wissen.

Zwar deutet die Studienlage auf ein großes Potenzial elaborierten Feedbacks in analogen sowie digitalen Lernsettings hin – dies gilt insbesondere für das Fach Mathematik, allerdings zeigen Meta-Analysen, dass die Effekte stark variieren (Mertens et al., 2022; van der Kleij et al., 2015). Daher ist eine differenzierte Betrachtung des eingesetzten elaborierten Feedbacks von besonderer Bedeutung und weitere Untersuchungen notwendig, die der Frage, wie lernförderliches elaboriertes Feedback gestaltet sein muss, nachgehen. Beispielsweise besteht die Gefahr, dass elaboriertes Feedback schlicht zu ausführlich ist und daher von den Lernenden als zu komplex oder nicht verständlich wahrgenommen wird, was wiederum eine fehlende Nutzung zur Konsequenz hat (Shute, 2008). Als besonders relevant erscheint die Untersuchung der Möglichkeiten und Wirksamkeit von Feedback auf digitalen Lernplattformen, denn trotz der empirischen Befundlage und dem Wissen um die Effektivität elaborierten Feedbacks wird schriftliches Feedback meist ausschließlich in Form von Noten präsentiert (Cizek et al., 1996; Lipnevich & Smith, 2009). Als am naheliegendsten Grund lässt sich die ohnehin hohe Belastung von Lehrkräften und der daraus resultierende Mangel an zeitlichen Ressourcen für aufwändig ausgearbeitetes elaboriertes Feedback vermuten. Lernplattformen bieten das Potenzial, bei gelungener Programmierung elaboriertes Feedback zu geben und damit Lehrkräfte zu entlasten.

3.2.2 *Feedback Zeitpunkt*

Eine weitere wichtige Frage hinsichtlich der möglichst lernwirksamen Gestaltung von Feedback stellt sich in Bezug auf den optimalen Zeitpunkt zur Präsentation des Feedbacks. Diesbezüglich lässt sich Feedback nach den Kategorien „direktes“ und „verzögertes“ Feedback unterscheiden (Shute, 2008). Die passende Präsentation hinsichtlich des Zeitpunkts von Feedback wird in der Wissenschaft kontrovers diskutiert, wobei sich ein besonderes Problem herauskristallisiert: es fehlt an einer einheitlichen Definition der Begriffe „direktes“ und „verzögertes“ Feedback. „Direkt“ steht in empirischen Studien zwar meist für die Präsentation von Feedback unmittelbar und ohne Verzögerung nach der Beantwortung/Bearbeitung eines jeden Items, in

anderen Studien wird direktes Feedback allerdings als zusammenfassende Bewertung nach einem Itemblock definiert. Dieses Feedback nach einem Block an Aufgaben wird wiederum von anderen Autor*innen als verzögertes Feedback eingeordnet (Attali & van der Kleij, 2017; Duss, 2020; Kulik & Kulik, 1988; van der Kleij et al., 2011). Bei der Begriffsdefinition von verzögertem Feedback stellt sich besonders die Varianz der Verzögerungslänge als problematisch heraus. So kann Feedback nicht nur als verzögert gelten, wenn es nach einem Itemblock, sondern auch Tage nach der Aufgabebearbeitung präsentiert wird (van der Kleij et al., 2011). In anderen Studien wiederum gilt Feedback bereits als verzögert, wenn es 10 – 30 Sekunden nach Bearbeitung eines Items präsentiert wird (Schroth, 1992). Die erörterten Definitionsprobleme von sowohl direktem als auch verzögertem Feedback gelten als elementare Ursache für inkonsistente Forschungsergebnisse hinsichtlich der Wirksamkeit von direktem und verzögertem Feedback und lassen ein Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Studien kaum zu (Chih-En, 1992; Kulik & Kulik, 1988; Mory, 2004). Digitale Lernplattformen besitzen das Potenzial Lernende direkt nach der Aufgabebearbeitung Feedback zu geben, was für Lehrkräfte im Schulalltag kaum möglich erscheint. Aufgrund dessen und als Vorbereitung auf die Interventionsstudie, insbesondere um ein möglichst lernförderliches Feedback in der Studie zu implementieren, soll unter Berücksichtigung der definitorischen Problematik die Studienlage zur Wirksamkeit von direktem und verzögertem Feedback dennoch differenziert betrachtet werden.

Direktes Feedback:

Als einer der ersten widmet sich Pressey (1926) in seinen Arbeiten der Frage nach dem passenden Zeitpunkt von Feedback an Lernende. Pressey vertritt die Meinung, dass direktes Feedback auf einen Test die Leistung steigern kann. Auch Skinner (1954) geht von einer Leistungssteigerung durch direktes Feedback aus. Behavioristische Theoretiker*innen sprechen Feedback im Allgemeinen eine verstärkende Funktion zu. Feedback soll demnach direkt nach einem erwünschten Verhalten zur Erhöhung der Wahrscheinlichkeit des erneuten Zeigens dieses Verhaltens präsentiert werden (Chih-En, 1992; Narciss, 2018). Kognitions- und instruktionspsychologische Sichtweisen hingegen sprechen Feedback eine fehlerkorrigierende Funktion zu. Daraus etablierte sich eine Hypothese, die den Einsatz direkten Feedbacks rechtfertigen soll: die „Guidance Hypothese“. Bei dieser wird von einer lenkenden Wirkung direkten Feedbacks beim anfänglichen Lernen ausgegangen (Duss, 2020). Schmidt et al. (1989) sowie Lewis und Anderson (1985) bestätigen die Annahmen der Guidance Hypothese. Auch weitere Studienergebnisse deuten auf die Wirksamkeit von direktem Feedback und auf eine bessere Lerneffizienz hin (Dihoff et al.; Schroth, 1992). In der Studie von Anderson et al. (1985) zeigt sich eine

schnellere Bearbeitung von Versuchspersonen, die mit direktem Feedback arbeiten im Vergleich zu den Proband*innen mit verzögertem Feedback, der Leistungstest liefert jedoch keinen Hinweis auf Unterschied zwischen den Gruppen. Für das Fach Mathematik erscheinen die Ergebnisse inkonsistent. Während Achtklässler*innen scheinbar von dem direkten Feedback profitieren (Paige, 1966), kann bei Grundschüler*innen keine höhere Lernwirksamkeit durch direktes Feedback im Vergleich zu verzögertem oder keinem Feedback festgestellt werden (Fyfe & Rittle-Johnson, 2016).

Hinsichtlich der Frage nach der Effektivität verschiedener Repräsentationszeitpunkte von Feedback zeigt eine Studie von Corbett und Anderson (2001) mit vierzig Studienanfänger*innen zum Programmieren, dass die Lerneffektivität von den Versuchspersonen mit direktem Feedback gefolgt von der Gruppe mit Fehlerkennzeichnung, der Feedbackgruppe auf Anforderung und der kein Feedbackbedingung am besten eingeschätzt wird. Diese positive Wahrnehmung direkten Feedbacks auf digitalen Lernplattformen lässt sich auch durch andere Studien bestätigen (Burrow et al., 2005; Peat & Franklin, 2002; Ricketts & Wilks, 2002). Hinsichtlich der Leistung schneiden alle drei Feedbackgruppen in einem Leistungstest besser ab als die Gruppe ohne Feedback. Zwischen den drei Feedbackbedingungen ist jedoch kein signifikanter Leistungsunterschied feststellbar. Eine Meta-Analyse von Kulik und Kulik (1988) differenziert zwischen verschiedenen Studienarten und liefert unter anderem Ergebnisse zu Studien, in denen programmiertes Material zum Einsatz kommt. Soweit aus den Ausführungen zu entnehmen ist, ist unter „programmierten Materialien“ Lernen am Computer zu verstehen – eine genauere Definition wird allerdings nicht geliefert. Auch wenn die Autoren darauf hinweisen, dass nur wenige der inkludierten Studien programmierte Materialien implementieren, deuten die Ergebnisse auf einen kleinen bis mittleren positiven Effekt direkten Feedbacks hin. Auch Ergebnisse einer Studie von Chih-En (1992) mit 91 Fünftklässler*innen zum computerbasierten Arbeiten an Geometrieaufgaben weisen auf eine Überlegenheit direktem gegenüber verzögertem Feedback hin. Allerdings scheint diese Überlegenheit im zeitlichen Verlauf zu verschwinden, da die beiden Gruppen in einem Follow-up-Test keine signifikanten Leistungsunterschiede mehr zeigen. Ob direktes Feedback wirksam ist oder nicht, scheint auch von dem Vorwissen der Lernenden abhängig zu sein. Während leistungsschwache Schüler*innen von direktem Feedback beim Bearbeiten von Mathematikaufgaben profitieren, scheint für ihre leistungsstarken Mitschüler*innen kein Effekt zu finden zu sein (Fyfe, 2012) (für mehr zum Einfluss des Vorwissens vgl. Kapitel 3.3.1).

Verzögertes Feedback:

Fürsprecher*innen des verzögerten Feedbacks kritisieren die behavioristische Sichtweise auf Feedback und sehen die Funktion von Feedback weniger in der Verstärkung richtigen Verhaltens, sondern mehr in der Bereitstellung von Informationen zur Korrektur von Fehlern (Anderson, R. H. et al., 1972; Roper, 1977). Außerdem stellen sie der Guidance Hypothese gegenüber, dass sich Lernende durch direktes Feedback lediglich auf dieses und nicht mehr auf eigene Fähigkeiten verlassen, bzw. die Ausbildung solcher Fähigkeiten (wie z. B. Selbstkorrektur) vernachlässigen (Schmidt et al., 1989). Der Guidance Hypothese steht der „Delay-Retention-Effect“ gegenüber. Dieser Effekt wurde zuerst in den Arbeiten von Brackbill et al. erwähnt (z. B. Brackbill & Kappy, 1962) und geht von einem nachhaltigeren Lernen durch verzögertes Feedback aus (Duss, 2020). Begründet wird diese Hypothese mit der Argumentation des Vergessens von Fehlern zwischen der Bearbeitung und dem verzögertem Feedback und damit die Generierung einer größeren Aufmerksamkeit auf die gegebenen Informationen (Anderson, R. H. et al., 1972). Während Kulhavy und Anderson (1972) in ihrer Studie mit 181 Highschool Schüler*innen Belege für den Delay-Retention-Effect finden, widerlegen andere Forschungsarbeiten diesen Effekt (Kippel, 1974; Phye & Andre, 1989). Eine computerbasierte Studie zur Automatisierung von Wissen mit 52 Zehntklässler*innen stellt die Überlegenheit verzögerten Feedbacks im Vergleich zu direktem besonders bei schwierigen Aufgaben fest (Clariana et al., 2000).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Studienlage zum Zeitpunkt von Feedback sehr inkonsistent, besonders aufgrund fehlender einheitlicher Definitionen erscheint. In Bezug auf das Fach Mathematik und computerbasiertes Lernen lassen sich jedoch Hinweise für eine leichte Überlegenheit direkten Feedbacks gegenüber verzögertem Feedback finden. Allerdings weist die Studienlage auch daraufhin, dass direktes Feedback nachhaltiges Lernen, beispielsweise durch den fehlenden Transfer von Gelerntem einschränken kann (Schroth, 1992). Duss (2020) fasst die empirischen Erkenntnisse zum Einsatz von direktem und verzögertem Feedback zusammen (vgl. Tabelle 6). Direktes Feedback ist verzögertem also nicht per se überlegen – und vice versa – sondern es gilt die Prämisse der Betrachtung der individuellen Lerngruppe sowie des Ziels des eingesetzten Feedbacks.

Tabelle 6: Entscheidungsfaktoren für die Nutzung von direktem und verzögertem Feedback nach Duss (2020, S. 15)

	Direktes Feedback	Verzögertes Feedback
Ziel	Effizienteres anfängliches Lernen	Vereinfachung des Transfers von Gelerntem
Feedbackebene	Aufgabenebene	Prozessebene
Vorwissen der Lernenden	Leistungsschwache Lernende	Leistungsstarke Lernende

3.3 Externale Determinanten wirksamen Feedbacks

Studien zur Wirksamkeit von Feedback zeigen inkonsistente Ergebnisse. Feedback präsentiert sich uns also als eine Art „Black Box“, die es zu erkunden gilt. Dabei nimmt nicht nur die Gestaltung von Feedback, sondern auch andere externe Faktoren einen Einfluss auf die Wirksamkeit von Feedback. Besonders individuelle Schülerfaktoren und die Interaktion mit dem Feedback scheinen beim Füllen dieser „Black Box“ von besonderer Relevanz (Lui & Andrade, 2022). Nachfolgend werden zwei für die vorliegende Studie relevante Faktoren vorgestellt: das Vorwissen der Lernenden sowie die Wahrnehmung des Feedbacks.

3.3.1 Vorwissen der Lernenden

Schon in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 kam zur Sprache, dass individuelle kognitive Lernvoraussetzungen beim Umgang mit Feedback und daraus hervorgehend die Wirksamkeit eine wichtige Rolle einnehmen. Das Vorwissen (z. B. zu einem bestimmten Inhaltsbereich) von Schüler*innen scheint also ein weiterer Grund für inkonsistente Ergebnisse zur Wirksamkeit von Feedback zu sein (Narciss & Huth, 2004), was eine wachsende Anzahl an Studien belegt (Fyfe & Rittle-Johnson, 2016; Heckler & Mikula, 2016; Krause et al., 2009). Bisherige Studienergebnisse deuten darauf hin, dass Feedback für Schüler*innen ohne oder mit geringem Vorwissen einen positiven Einfluss auf ihre mathematische Leistung hat. Lernende mit mittlerem bis hohem Vorwissen profitieren jedoch nicht von dem Feedback oder verschlechtern sich sogar hinsichtlich ihrer mathematischen Leistung (Fyfe, 2012; Fyfe & Rittle-Johnson, 2016).

In ihren Studien zum Einfluss von Feedback gegenüber keinem Feedback im Kontext der Bearbeitung mathematischer Gleichungen bestätigen Fyfe und Rittle-Johnson (2016) diese Annahmen. Lernende ohne Vorwissen zum Lösen von Gleichungen profitieren vom direkten Feedback im Vergleich zu keinem Feedback insbesondere in Bezug auf das prozedurale Wissen. Die Lernenden mit Vorwissen bezüglich der Strategien zum Lösen von Gleichungen hingegen zeigen bessere Leistungen hinsichtlich des konzeptuellen sowie prozeduralen Wissens, wenn sie kein Feedback erhalten. Negative Effekte lassen sich für die Feedbackart „KR“ auf

konzeptuelles sowie prozedurales Wissen feststellen. Feedback kann demnach für Lernende mit Vorwissen sogar negative Effekte haben. Neutrale Effekte für Schüler*innen mit Vorwissen und positive Effekte von Feedback für Lernende ohne Vorwissen lassen sich auch für Studien mit einem digital-gestützten Design bestätigen (Morrison et al., 1995; Fyfe & Rittle-Johnson, 2016). Erklärt werden können die negativen bzw. neutralen Effekte von Feedback für Schüler*innen mit höherem Vorwissen durch die Konzentration auf die richtige oder falsche Bearbeitung einer Aufgabe. Schüler*innen mit hohem Vorwissen haben meist eine höhere Erwartungshaltung an ihre Leistung und fokussieren sich daher eher auf die Leistungsrückmeldung und weniger auf Informationen, die sie darin befähigen, sich zu verbessern (Kluger & DeNisi, 1996). Außerdem enthält Feedback meist nicht benötigte Informationen, welche kognitive Ressourcen beanspruchen und damit zu einem sogenannten „cognitive load“ führen können (Sweller et al., 2011) (Stichwort: expertise reversal effect³). Unter Beachtung des Vorwissens spielt demnach vor allem die Komplexität des Feedbacks eine entscheidende Rolle (vgl. dazu auch Kapitel 3.2.1). Lernende ohne oder mit geringem Vorwissen brauchen durch das Feedback mehr Unterstützung und daher auch mehr Informationen als Lernende mit mittlerem oder hohem Vorwissen. Die Komplexität von Feedback sollte demnach an das Vorwissen der Schüler*innen angepasst sein (Heckler & Mukla, 2016). Elaboriertes Feedback (wie z. B. Lösungsbeispiele) wirkt daher vermutlich hauptsächlich für Lernende mit geringem oder keinem Vorwissen (Smits et al., 2008). Lernende mit mittlerem oder hohem Vorwissen, die mit Aufgaben, aber nicht mit Feedback oder nur wenig komplexem Feedback, konfrontiert werden, müssen mehr kognitive Ressourcen nutzen, um die Aufgaben zu bewältigen. Anders als bei Lernenden ohne oder mit geringem Vorwissen, erlauben ihre kognitiven Schemata die Verknüpfung ihres Vorwissens und der aktuellen Aufgabenstellung (Smits et al., 2008; Vygotsky, 1978). So zeigt eine Studie von Smits et al. (2008), dass Lernende mit mittlerem bis hohem Vorwissen in einem digital-gestützten Studiendesign mehr von Feedback, „[...] that provides information on the overall approach to the problem without providing details of each step to be taken, which they are challenged to fill in themselves“ (S. 184) als von elaboriertem Feedback, welches ein zusätzliches Lösungsbeispiel liefert, profitieren. Allerdings schreibt eine neue Meta-Studie von Mertens et al. (2022) elaboriertem Feedback sowohl für Lernende mit geringem und hohem

³ Der „expertise reversal effect“ (deutsch: Expertise-Umkehr-Effekt) sagt aus, dass leistungsschwache Lernende bei zu wenig Feedback zu viele kognitive Ressourcen beanspruchen müssen, wohingegen leistungsstarke Lernende durch zu viel Feedback eine nicht notwendige kognitive Belastung empfinden (Kalyuga et al., 2003; Kalyuga, 2007).

Vorwissen hohe positive Effekte zu. Wie diese konträren Ergebnissen im Vergleich zu früheren Studien zustande kommen, gilt es noch zu klären.

3.3.2 *Wahrnehmung durch Feedbackempfangende*

„Sich den Zwischenschritt der Wahrnehmung und Interpretation einer stets uneindeutigen Situation bewusst zu machen, kann helfen zu verstehen, warum Kommunikation im Unterricht manchmal misslingt“ (Vieluf et al., 2020).

Mit dem vorangegangenen Zitat bringen Vieluf und Kolleg*innen zum Ausdruck, dass die Vermittlung von Informationen (z. B. in Form von Feedback) nicht nur von der Gestaltung der Information abhängig ist, sondern insbesondere von der empfangenden Person und ihren inneren Einstellungen und wie diese Einstellungen Verarbeitungsprozesse beeinflussen. Dabei muss die Kommunikation nicht zwangsläufig zwischen Lehrkraft und den Lernenden stattfinden, sondern gilt gleichermaßen für die Interaktion zwischen digitaler Lernplattform und Schüler*innen. Es scheint, dass die Wahrnehmung des Feedbacks den Einfluss von Feedback auf die Leistung mediiert. Die Wahrnehmung von Feedback lässt sich dabei als: „[...] reflective judgments made during or after an assessment event about [...] feedback that students have received“ (Lui & Andrade, 2022, S. 3) definieren.

Da den Lernenden lange Zeit eine passive Rolle als empfangende Instanz von Feedback zugeschrieben wurde (vgl. Kapitel 3.1), befassten sich nur wenige Studien mit dem Einfluss der Wahrnehmung des Feedbacks durch die Lernenden und auch in früherer Vergangenheit scheint die Rolle der Wahrnehmung von geringer Relevanz und rückt nur nach und nach in den Fokus wissenschaftlicher Feedbackforschung (Lipnevich & Panadero, 2021). Das liegt vor allem daran, dass

[...] teachers, feedback designers and researchers assume that students automatically perceive feedback in the way they intended it to be perceived and expect that the information contained in the feedback is unproblematically taken as input into the information-processing, motivational or self-regulation systems (Harks et al., 2013, S. 4).

Allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Feedbackinformationen von den Empfangenden tatsächlich so wahrgenommen werden, wie erwünscht (Higgins et al., 2001; Sadler, 1998) und so gilt als Voraussetzung für das Ziel des vollumfänglichen Verstehens der Wirksamkeit bzw. der fehlenden Wirksamkeit von Feedback, die Anerkennung der Lernenden als aktive feedbackempfangende Personen und das Verstehen innerer Prozesse beim Umgang mit dem Feedback (Leighton, 2019).

Trotz der geringen Studienlage scheint die positive Wahrnehmung von Feedback als eine relevante Variable in theoretischen Diskussionen für einen erfolgreichen Umgang mit Feedback anerkannt zu sein (Mouratidis et al., 2010; van der Kleij & Lipnevich, 2020). Einige empirische Studien belegen die theoretisch diskutierte Relevanz der Notwendigkeit positiver Feedbackwahrnehmung als Voraussetzung der Interaktion von Lernenden mit Feedback zum Zwecke der Leistungssteigerung (Jonsson & Panadero, 2018; van der Kleij & Lipnevich, 2020). So deuten eine Mehrzahl der Studienergebnisse in einem Review von van der Kleij und Lipnevich (2020) auf den Einfluss der Wahrnehmung auf die Leistung hin, auch wenn konträr dazu eine einzelne Studie von einem fehlenden Zusammenhang zwischen Wahrnehmung und Leistung berichtet.

Darüber hinaus findet eine Teilstudie des Co²Ca-Projekts Hinweise auf die Mediatorrolle der wahrgenommenen Nützlichkeit des Feedbacks auf die mathematische Leistung von Schüler*innen (z. B. Harks et al., 2013; Rakoczy et al., 2019). Auch weitere Studien deuten auf den Einfluss der wahrgenommenen Nützlichkeit auf die Leistung von Lernenden hin (Havnes et al., 2012; Jonsson, 2013; Lipnevich & Smith, 2009, 2009). Die Wahrnehmung von Feedback durch die empfangende Person bezüglich der Nützlichkeit scheint im Allgemeinen allerdings von „sehr nützlich“ bis „nicht nützlich“ sehr divers (van der Kleij & Lipnevich, 2020). Es gilt demnach zu klären, welche Feedbackart als positiv wahrgenommen wird.

Auch weitere Faktoren scheinen neben der Feedbackart die Wahrnehmung zu beeinflussen. So weisen metaanalytische Daten darauf hin, dass emotionale Variablen die Wahrnehmung von Feedback beeinflussen (van der Kleij & Lipnevich, 2020). Außerdem kann die Wahrnehmung des Angebots (z. B. des Feedbacks) besonders aufgrund des Vorwissens der Lernenden sehr individuell ausfallen (Vieluf et al., 2020).

Die Relevanz des Einbezugs der Feedbackwahrnehmung in empirische Studien hebt Mory (2003) insbesondere für das Arbeiten mit digitalen Lernplattformen hervor, denn durch den flexiblen Einsatz ist der Freiheitsgrad für die Lernenden beispielsweise hinsichtlich der zeitlichen Intensität der Nutzung, welche durch eine positive Wahrnehmung des Feedbacks gesteigert werden könnte, besonders hoch. Das bedeutet konkret: Das Arbeiten mit digitalen Lernplattformen kann nicht nur im Unterricht, sondern auch flexibel und durch die Lernenden selbstständig im außerschulischen Kontext integriert werden. Diesbezüglich lässt sich vermuten, dass Schüler*innen mit einer positiveren Feedbackwahrnehmung mehr Zeit zum Arbeiten mit digitalen Lernplattformen aufwenden als Schüler*innen mit negativen Einstellungen gegenüber digitalem Feedback. Studienergebnisse mit digital-gestütztem Design deuten darauf hin, dass Schüler*innen elaboriertes Feedback im Vergleich zu einfacheren Feedbackarten (wie z. B.

KR) als positiver (z. B. nützlicher) wahrnehmen (Smits et al., 2008; van der Kleij et al. 2011). Außerdem scheinen Lernende direktes Feedback gegenüber verzögertem zu bevorzugen (van der Kleij et al. 2011) und Feedback als positiver wahrzunehmen, wenn ihnen eine Möglichkeit geboten wird, das Feedback umzusetzen (Pokorny & Pickford, 2010).

Die Relevanz der Feedbackwahrnehmung wird auch im erweiterten Angebot-Nutzungs-Modell von Helmke (2015)⁴ thematisiert. Helmke (2015) fokussiert neben dem Angebot und der Nutzung auch die „Wahrnehmung und Interpretation“ von Unterrichtsangeboten und damit „Mediationsprozesse von Seiten der Lernenden“ (Kohler & Wacker, 2013, S. 247) (vgl. Abbildung 14). So führt erst eine positive Wahrnehmung dazu, dass Feedback überhaupt genutzt wird (Lipnevich & Smith, 2009). In welchem Zusammenhang die Wahrnehmung und Nutzung von Feedback zueinanderstehen sowie die Relevanz der Feedbacknutzung als auch dessen Operationalisierung und Gründe für eine (fehlende) Feedbacknutzung werden nachfolgend dargestellt.

3.4 Zur Relevanz der Feedbacknutzung

Stellt man sich ein (utopisches) Szenario vor, in dem alle bis zu diesem Zeitpunkt der Arbeit beschriebenen internalen und externalen Einflüsse auf die Wirksamkeit von Feedback optimal umgesetzt sind, das heißt: Hinsichtlich der Komplexität und des Zeitpunkts ist das Feedback optimal passend zum Vorwissen der Lernenden gestaltet und die Lernenden nehmen das Feedback als positiv wahr, dann gilt es dennoch zu berücksichtigen, wie die Lernenden mit dem Feedback interagieren, denn: Damit lernförderlich gestaltetes Feedback tatsächlich die Leistung beeinflussen kann, müssen Lernende das Feedback aktiv nutzen, um den erwünschten Zielzustand erreichen (Jonsson & Panadero, 2018; Kyaruzi et al., 2019; van der Kleij & Lipnevich, 2020).

Die Feedbacknutzung⁵ stellt neben der Gestaltung des Feedbacks (internale Determinanten) und Eigenschaften der Lernenden (externale Determinanten) (Lui & Andrade, 2022; Strijbos et al., 2010) demnach eine weitere wichtige Einflussvariable auf die Leistung dar. Das tatsächliche

⁴ Die Angebot-Nutzungs-Modell von Helmke (2010) geht auf die Überlegungen von Fend zurück, der den Begriff „Angebot-Nutzungs-Modell“ 1988 erstmalig nutzt. Das Modell wurde im Laufe der Zeit mehrfach adaptiert (Reusser & Pauli, 2010; Helmke, 2010).

⁵ Die aktive Nutzung eines Lerngegenstandes (wie z. B. das Feedback einer digitalen Lernplattform) wird unter anderem auch als behavioral Engagement bezeichnet (vgl. z. B. Reinhold et al., 2021). Das behavioral Engagement kann als Teil des classroom Engagements klassifiziert werden, welches sich für den (mathematischen) Lernerfolg als wichtig erwiesen hat (Appleton et al., 2006; Fung et al., 2018; Singh, Kusum et al., 2002). Definieren lässt sich behavioral Engagement als „extent to which students are involved in the learning process actively, as indicated by observable behaviors (e.g., time on task [...])“ (Reinhold et al., 2021, S. 5). Für diese Arbeit gilt jedoch, dass ausschließlich der Term „Feedbacknutzung“ verwendet wird.

Lesen und die kognitive Verarbeitung von Feedback lassen sich in (quantitativen) Studien allerdings nur schwer nachvollziehen. Daher werden meist Indikatoren, die die Feedbacknutzung vermuten lassen, herangezogen. Es lassen sich in der Literatur verschiedene Ansätze ausmachen, um die Nutzung von Feedback zu erfassen. Van der Kleij et al. (2011) beziehen sich beispielsweise auf die Zeit, die ein Fenster, welches Feedback beinhaltet, geöffnet ist, um die Feedbacknutzung der Lernenden zu differenzieren. Beal et al. (2010) wiederum operationalisieren die Feedbacknutzung über die Anzahl an Hilfen, die die Lernenden anschauten. Ebenso erfassen Reinhold et al. (2021) mit Hilfe von Prozessdaten die Anzahl angezeigter Hinweise sowie die Feedbackzeit durch „calculating the time between two consecutive tasks of the same interactive exercises and afterward preprocessed just as problem solving time“ (S. 9).

Ganz allgemein exponiert sich die Relevanz der Feedbacknutzung von Unterrichtsangeboten in der Forschung zu schulischen Lehr-Lern-Prozessen einhergehend mit den Überlegungen von Fend (1988) zum bereits in Kapitel 3.3.2 angesprochenen Angebot-Nutzungs-Modell. In seiner Monografie spricht Fend (1998) davon, dass „optimale Lernergebnisse dann zu erwarten sind, wenn ein bestmögliches Angebot von Schülern und Schülerinnen maximal genutzt wird“ (S. 321). Das Modell greift demnach also nicht nur die Qualität und Quantität von Lerngelegenheiten (Angebot) auf, sondern auch das Nutzungsverhalten der Lernenden. Das Nutzungsverhalten scheint in einem Zusammenhang mit der Leistung von Schüler*innen zu stehen. Dies gilt für analoge Studiendesigns (Christenson et al., 2012) sowie für digital-gestützte Designs (Huang et al., 2019; Junco & Clem, 2015; Reinhold et al., 2021). Die Angebotskomponente wird in den unterschiedlichen Modellen nicht immer einheitlich definiert (Vieluf et al., 2020), meist wird jedoch das Lehrendenhandeln als Angebot interpretiert (z. B. Fend, 2009; Lipowsky, 2006). Dieser Interpretation folgend kann auch das Einführen einer digitalen Lernplattform durch die Lehrkraft als Unterrichtsangebot gedeutet werden. Kognitive Lernprozesse ausgelöst durch Lernaktivitäten mit eben dieser Lernplattform innerhalb oder außerhalb des Unterrichts werden wiederum als Nutzung angesehen (Vieluf et al., 2020). Abbildung 14 zeigt ein auf Fends Arbeiten basierendes Angebot-Nutzungs-Modell nach Helmke (2015) und Lipowsky (2006) adaptiert an die Grundideen der vorliegenden Studie.

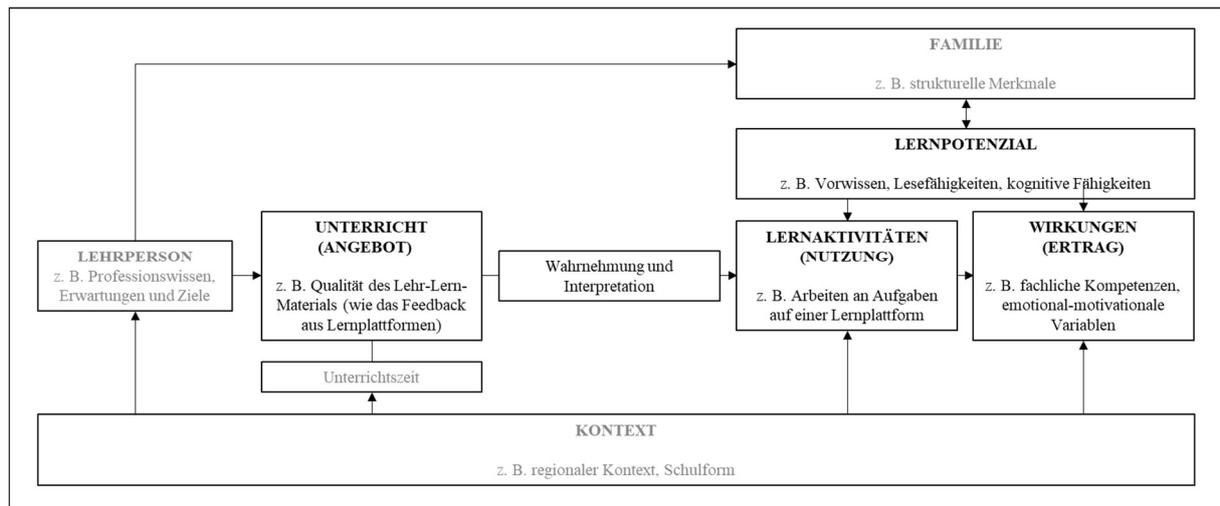


Abbildung 14: Ein Angebots-Nutzungs-Modell adaptiert nach Helmke (2015) & Lipowsky (2006), alle für diese Studie relevanten Komponenten wurden hervorgehoben

3.4.1 Einflüsse auf die Feedbacknutzung – Gründe für die (fehlende) Nutzung

Für den deutschsprachigen Raum haben Reinhold et al. (2021) eine Studie mit Sechstklässler*innen eines Gymnasiums durchgeführt und diese unter anderem hinsichtlich ihres Feedbacknutzungsverhaltens beim Arbeiten mit einem eBook zum Thema „Brüche“ untersucht. Im Mittel betrachteten die Lernenden das Feedback nach jeder Aufgabe 6.72 s und nutzten ca. 11 Hilfen. Reinhold et al. (2021) betonen jedoch, dass das Feedbacknutzungsverhalten stark zwischen den Lernenden variiert. Außerdem scheint die Nutzung von Feedback meist nicht sehr produktiv (Jonsson & Panadero, 2018). Woran liegt es aber, dass manche Lernende das Feedback (nicht) nutzen? Hinsichtlich dieser Frage lassen sich verschiedene internale sowie externe Erklärungen heranziehen. Jonsson und Panadero (2018) konstatieren allerdings, dass mögliche Einflussfaktoren auf die Feedbacknutzung unzureichend untersucht sind.

Internale Gründe:

Internale Gründe beziehen sich vor allem auf die Lernenden und ihre Voraussetzungen zur Feedbacknutzung. Viele der individuellen Lernendeneigenschaften mit potenziellen Einfluss auf die Feedbacknutzung werden allerdings meist nur theoretisch diskutiert und selten empirisch belegt, wodurch keine klaren Folgerungen zu Einflussfaktoren auf die Feedbacknutzung gemacht werden können, was weitere Forschungsarbeiten notwendig macht. Den Ideen des Angebot-Nutzung-Modells folgend ist beispielsweise von einem Zusammenhang der Wahrnehmung und der Nutzung von Feedback auszugehen (van der Kleij & Lipnevich, 2020). Mit einer positiven Feedbackwahrnehmung geht die Bereitschaft zur Nutzung des Feedbacks einher (Sandler, 1989; van der Kleij & Lipnevich, 2020). So sollten die Lernenden das Feedback beispielsweise als nützlich empfinden (Jonsson, 2013; Jonsson & Panadero, 2018; Rakoczy et al., 2019;

vgl. Kapitel 3.3.2). Als nützlicher empfinden Schüler*innen eher positives Feedback und interagieren mit diesem mehr (Jonsson & Panadero, 2018). Allerdings wird auch kontrastiert, dass kritisches Feedback zur Steigerung der Leistung notwendig ist (Drew, 2001; K. Holmes & Pappageorgiou, 2009).

Auch eine Vielzahl an Lernvoraussetzungen, wie beispielsweise das Vorwissen der Lernenden werden in Angebot-Nutzungs-Modellen als möglicher Prädiktor der Feedbacknutzung herangezogen (z. B. Seidel, 2014; Vieluf et al., 2020). Passend dazu gestaltet sich eine Studie von Beal et al. (2010) im angloamerikanischen Raum mit Sechstklässler*innen, in der die Autor*innen die Nutzungsdaten von Lernenden, die mit einem ITS an arithmetischen und Bruchrechnungsaufgaben arbeiteten, analysieren. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass Lernende mit geringerem Vorwissen mehr Hilfen der Lernplattform in Anspruch nehmen als Lernende mit höherem Vorwissen. Eben die Schüler*innen, die mehr auf die Hilfen zurückgreifen, verbessern mit einer höheren Wahrscheinlichkeit ihre Mathematikleistung. Zur Diskussion um den Einfluss des Vorwissens auf die Feedbacknutzung sagen Jonsson und Panadero (2018), dass „students with [...] high achievement are more likely to engage with their feedback“ (S. 539). Was unter „high achievement“ genau zu verstehen ist, wird jedoch nicht ausgeführt.

Auch Hilz et al. (2023) vermuten in ihrer Studie mit Fünftklässler*innen, die eine digitale Lernplattform im Fach Mathematik nutzten, dass das Vorwissen ein Prädiktor für die Feedbacknutzung sei. Außerdem gehen sie von dem mathematischen Selbstkonzept, der Mathematikangst, dem sozioökonomischen Status sowie dem Migrationshintergrund als Prädiktoren bezüglich der Feedbacknutzung aus. Zwar geht es in der Studie um die Anzahl bearbeiteter Aufgaben und nicht explizit um den Umgang mit dem Feedback. Da Feedback einen Teil der Aufgabenbearbeitung darstellt, lässt sich dennoch eine Übertragbarkeit auf die Feedbacknutzung vermuten. Die Ergebnisse zeigen allerdings nur, dass Schüler*innen mit einer höheren Mathematikangst weniger mit der Lernplattform interagierten. Alle anderen Variablen stellen sich nicht als signifikante Prädiktoren heraus. Dies scheint zu überraschen, so gilt meist die Annahme, dass Schüler*innen mit einer positiveren Ausprägung motivational-emotionaler Variablen (z. B. Selbstkonzept, Selbstwirksamkeitserwartung) das Feedback mehr nutzen (Fong & Schallert, 2023; Jonsson & Panadero, 2018). So sollen sich Schüler*innen mit einer höheren Selbstwirksamkeit intensiver mit Feedback auseinandersetzen und dabei besonders am feed forward interessiert sein (Fong & Schallert, 2023). Dies scheinen auch Ergebnisse von Reinhold et al. (2021) zu bestätigen. In ihrer Studie finden sie einen schwach positiven Zusammenhang für die Betrachtungszeit von Feedback zu Bruchrechnungsaufgaben und dem Selbstkonzept sowie der

Freude und einen negativen mit der Angst. Ähnliches gilt für die Anzahl an genutzten Hilfen, wobei auch die Angst schwach positiv mit den Hilfen korreliert.

Externale Gründe:

Neben den internalen Gründen als Erklärungen für eine (fehlende) Feedbacknutzung spielen externe Aspekte eine wichtige Rolle hinsichtlich des Nutzungsverhaltens. Externale Gründe beziehen sich dabei hauptsächlich auf die Gestaltung des Feedbacks. In ihrer Studie mit Erstsemesterstudierenden finden van der Kleij et al. (2011) beispielsweise heraus, dass Lernende direktem Feedback auf einer digitalen Lernplattform mehr Aufmerksamkeit schenken als verzögertem. Dies bestätigt auch ein Review von Winstone et al. (2017). Hinsichtlich des Zeitpunkts von Feedback als Prädiktor der Feedbacknutzung scheinen jedoch weitere Faktoren (wie z. B. die Aufgabenschwierigkeit) eine wichtige Rolle zu spielen, weshalb nicht per se von einer längeren Feedbacknutzung direkten gegenüber verzögerten Feedbacks ausgegangen werden kann. Außerdem verbringen die Lernenden mehr Zeit auf dem Feedback, wenn ihre Antwort inkorrekt war im Vergleich zu einer korrekten Antwort (van der Kleij et al., 2011). Darüber hinaus ist für eine effektive Feedbacknutzung wichtig, dass das Feedback nicht zu viele Informationen, die nicht benötigt werden, übermittelt und relevante Informationen in einer Lernenden gerechten Sprache vermittelt sowie Fachbegriffe ausreichend erläutert werden (van der Kleij & Lipnevich, 2020; Jonsson & Panadero, 2018). Bei beiden Aspekten – einem zu viel an Informationen sowie einer zu schwierigen Sprache – handelt es sich um Punkte, die eine mögliche Überforderung der Lernenden verursachen (van der Kleij & Lipnevich, 2020). Für eine intensivere Feedbacknutzung sollte das Feedback außerdem Informationen dazu liefern, wieso eine Antwort falsch ist und wie weiter vorzugehen ist. Demnach sollte das Feedback möglichst elaboriert sein (Fong & Schallert, 2023; Narciss, 2004).

3.5 Förderung der Motivation und Emotionen als weiteres Zielkriterium erfolgreichen Lehren und Lernens

Wie das Angebot-Nutzungs-Modell aus Abbildung 14 zeigt, wird der Fokus neben der (mathematischen) Leistung als zentrale abhängige Variable auch immer mehr auf motivationale und emotionale Variablen als Zielkriterien guten Unterrichts gelegt (z. B. Kuklick & Lindner, 2023), denn Schule ist ein Ort, der ganzheitlich bilden sollte. Das heißt, dass es nicht nur um die kognitiven Leistungen der Schüler*innen geht, sondern Ziel auch ihre motivationale und emotionale Stärkung sein sollte. Diesbezüglich werden motivationale und emotionale Variablen immer häufiger als Ertrag des Zusammenspiels von Angebot und Nutzung verortet (Lip-

owsky, 2006; Reusser & Pauli, 2003). Wieso die Berücksichtigung von Motivation und Emotionen zum Verstehen von Lehr-Lern-Prozessen entscheidend ist, wird im Laufe des Kapitels verdeutlicht. So soll auch diese Arbeit einen Beitrag zur Unterstützung von Feedback nicht nur im Hinblick der Leistung von Schüler*innen, sondern auch deren Ausbildung hoher Motivation und positiver Emotionen liefern.

Der Begriff der Motivation lässt sich aus dem Lateinischen „movere“ ableiten und bedeutet so viel wie „sich bewegen“. Motivation umfasst also eine innere Haltung einer Person, die eben diese Person dazu bringt, ein bestimmtes Verhalten zur Erfüllung eines Zielstandes zu zeigen. Bei fehlender Motivation bleibt das Verhalten aus oder wird abgebrochen (Kleinginna & Kleinginna, 1981). Eine ausreichende Motivation kann als Grund für die Ausführung von Handlungen verstanden werden (Holodynski & Oerter, 2008). Reeve (1996) fasst die Aufgaben von Motivation sowie die Einflussfaktoren auf die Motivation wie folgt zusammen:

Motivation involves the internal processes that give behavior its energy and direction. Motivation originates from a variety of sources (needs, cognitions and emotions) and these internal processes energize behaviour in multiple ways such as starting, sustaining, intensifying, focusing, and stopping it (S. 2).

Auch Emotionen scheinen in einem direkten Zusammenhang mit der Motivation zu stehen. Den Gegenstand der „Emotion“ zu definieren, scheint zwar intuitiver, aber die Formulierung einer genauen Begriffsdefinition verhält sich als weitaus schwieriger, vor allem weil sich im Laufe der Jahre immer mehr Emotionstheorien entwickelten. So geht beispielsweise die psychologische Emotionstheorie von einer körperlichen Reaktion als Emotion aus: Die Wahrnehmung („feeling“) der körperlichen Veränderung „is the emotion“ (James, 1984, S. 190 zit. in Senge, 2022). Kognitivistische Theorien wiederum definieren Emotionen folgendermaßen:

Das gemeinsame Band der unter dem Begriff ›Kognitivismus‹ versammelten Ansätze ist die Überzeugung, dass Emotionen untrennbar mit Urteilen, Wertungen oder Überzeugungen verbunden sind. Emotionen sind in dieser Vorstellung spezifische Akte, deren zentrale Funktion in der kognitiven Bewertung von Situationen besteht. Die kognitiven Elemente sind dabei nicht Auslöser von Gefühlen, sondern Bestandteil derselben und die Basis aufgrund derer sich Gefühle individualisieren lassen. Demzufolge werden positive Emotionen durch eine positive Situationsbewertung ausgelöst, negative Emotionen durch eine negative Bewertung in Hinsicht auf persönliche Werte, Ziele, Wünsche. Nicht also

die Situation als solche erzeugt bestimmte Gefühle, sondern die subjektive Bewertung (Senge, 2022, S. 16).

Den Definitionen von Motivation und Emotionen folgend, umfassen die beiden Konstrukte eine große Bandbreite an Variablen und können dementsprechend vielfältig konzeptualisiert und operationalisiert werden. Reinhold et al. (2021) erfassen Motivation und Emotionen beispielsweise beim Arbeiten an mathematischen Aufgaben mit einem digitalen Lernmedium über die intrinsische Motivation, das situative Interesse sowie die Belastung – letzte beiden als Konstrukte der Emotionen – der Schüler*innen⁶.

Intrinsisch motivierte Schüler*innen zeichnen sich dadurch aus, dass sie sich aus Freude, Interesse und/oder aufgrund der wahrgenommenen Relevanz des Inhalts Aufgaben widmen und nicht aufgrund externer Belohnungen oder Druck von Dritten (Fong et al., 2019; Fong & Schallert, 2023; Reinhold et al., 2021). (Situatives) Interesse wiederum ist „[...] the accompaniment of the identification, through action, of the self with some object or idea, because of the necessity of that object or idea for the maintenance of a self-initiated activity" (Dewey, 1913, S. 14). Während persönliches Interesse ein generelles, schwer veränderbares Konstrukt beispielsweise gegenüber dem Fach Mathematik im Allgemeinen darstellt, ist das situative Interesse beeinflussbar und bezieht sich auf einen bestimmten Kontext (z. B. die Addition von Brüchen). Für ein hohes situatives Interesse ist die Bedeutsamkeit des Kontexts sowie die Einbindung der Lernenden relevant (Mitchell, 1993). Die wahrgenommene Belastung lässt sich als „[...] negative aspects of engaging in particular classroom activities or tasks while learning mathematics in school“ (Reinhold et al., 2021, S. 4) definieren. Die Belastung erfasst demnach, in welcher Höhe Schüler*innen sich Anstrengungen bei der Aufgabenbearbeitung stellen müssen (Reinhold et al., 2021). Speziell für die Arbeit ist es demnach Ziel zu untersuchen, inwiefern die intrinsische Motivation und das situative Interesse von Lernenden durch das Arbeiten an mathematischen Aufgaben mit einer digitalen Lernplattform gesteigert werden können sowie die Belastung reduziert werden kann.

⁶ Reinhold et al. (2021) konzeptualisieren Motivation und Emotionen über das Konstrukt „emotional engagement“, welches insbesondere „[...] students' affective reactions to learning itself, relatedness with academic-related objects, and sense of school-related belongingness“ (Hong et al., 2020, S. 2) beschreibt und somit verschiedene motivationale und emotionale Reaktionen auf Lehr-Lern-Prozesse umfasst. Wie schon das behavioral engagement stellt das emotional engagement eine Dimension des classroom engagements dar. Ganz allgemein handelt es sich bei dem emotional engagement um emotionale und motivationale Reaktion innerhalb des schulischen Kontextes unter anderem gegenüber der Lehrkraft (Fredricks et al., 2004) und bestimmt den Grad des Zugehörigkeitsgefühls zur Schule, den schulischen Akteur*innen und dem Fach (Appleton et al., 2006; Cleary & Lui, 2022; Finn, 1989). Spezifischer kann das emotional engagement unter anderem ausdrücken, in welchem Maße Lernende emotional beim Bearbeiten von (mathematischen) Aufgaben involviert sind (Skinner, Ellen A. & Belmont, 1993).

Hinsichtlich des Angebot-Nutzungs-Modells stehen vor allem die Feedbacknutzung und Motivation und Emotionen in einem Zusammenhang (vgl. Kapitel 3.4). So führt eine hohe Feedbacknutzung potenziell nicht nur zu höheren Leistungen, sondern auch zu einer höheren Motivation und positiveren Emotionen (Finn & Zimmer, 2012).

Vor allem eine hohe Motivation und positive Emotionen führen zu einer stärkeren Auseinandersetzung mit den Lerninhalten und damit zu einer höheren Chance des Verstehens (zur Relevanz des Verstehens vgl. Kapitel 1.2) (Deci & Ryan, 2004). Motivation und Emotionen der Lernenden können also durchaus Einfluss auf die Leistung nehmen (Chase et al., 2014). Grundvoraussetzung für lernförderliche Motivation und Emotionen sind unter anderem eine positive Wahrnehmung der Lernsituation (z. B. Kompetenzerleben; zur Wahrnehmung vgl. Kapitel 3.3.2) (Cheon et al., 2019; Seidel, 2014). Beim Lernen mit einer digitalen Lernplattform wird den Schüler*innen zu einem gewissen Umfang Freiheit gewährt, um eigene Entscheidungen zu treffen und bei der Bearbeitung von zum Vorwissen der Lernenden angepassten Aufgaben wird ihr Kompetenzerleben gestärkt (Hillmayr et al., 2020). Ziele von Unterricht sollten die Förderung einer hohen Motivation und positiven Emotionen sein. Für das Fach Mathematik scheinen Motivation und Emotionen jedoch generell negativer im Vergleich zu weniger kognitiv anspruchsvollen Fächern auszufallen (Pöysä et al., 2018).

Diesbezüglich weisen digitale Lernplattformen das Potenzial hinsichtlich der Steigerung von Motivation und Emotionen von Schüler*innen beim Bearbeiten mathematischer Aufgaben auf (Aliasgari et al., 2010; Dresel & Haugwitz, 2008; Özyurt et al., 2014). Eine höhere Motivation und positive Emotionen beim Arbeiten mit einer digitalen Lernplattform im Vergleich zum Arbeiten mit analogem Arbeitsmaterial lassen sich unter anderem durch den sogenannten „Neuheitseffekt“ erklären (Hillmayr et al., 2017). Durch die Implementation einer unbekannteren oder auch wenig genutzten Lernplattform in Lehr-Lern-Prozesse wird beispielsweise das situative Interesse von Schüler*innen durch die Neuartigkeit des Lernmediums unmittelbar gesteigert. Das situative Interesse auf einem hohen Level zu halten, gelingt allerdings nicht alleine durch den bloßen Einsatz einer digitalen Lernplattform (Mitchell, 1993).

Besonders Feedback, welches sich in digitalen Lernplattformen implementieren lässt, scheint die Motivation und Emotionen zu beeinflussen (Henderlong & Lepper, 2002; Kuklick & Lindner, 2023), wobei von eher kleinen Effekten auszugehen ist und Feedback Lernende beispielsweise auch demotivieren kann (Wisniewski et al., 2020). Einfaches Feedback (wie KR) scheint Lernende zu motivieren, wenn es hauptsächlich positiv ausfällt (bspw. „Deine Antwort ist korrekt.“) und zu demotivieren, wenn die Antwort inkorrekt ist. Dabei hat negatives Feedback

übermittelt von einer Lernplattform einen größeren negativen Einfluss auf Motivation und Emotionen als Feedback von menschlichen Tutor*innen (Fong et al., 2019). Elaboriertes Feedback wiederum führt im Gegensatz zu KR zu höherer Motivation und positiveren Emotionen (Kuklick & Lindner, 2023). So zeigt auch eine Meta-Analyse von Fong et al. (2019) zum Einfluss von Feedback auf die intrinsische Motivation, dass negatives Feedback weniger demotivierend ist, wenn es zusätzliche Informationen beispielsweise zum weiteren Vorgehen (= elaboriertes Feedback) enthält. Elaboriertes Feedback ist demnach einfachen Feedbackformen (wie z. B. KR) hinsichtlich der Motivationssteigerung überlegen. Kuklick und Lindner (2023) erklären die Überlegenheit elaborierten Feedbacks mit der Umlenkung der Aufmerksamkeit von den eigenen Fehlern hinzu der Aufgabe. Auch das multiple-try Feedback scheint Potenzial hinsichtlich des positiven Einflusses auf Motivation und Emotionen zu haben. So lässt sich argumentieren, dass durch die Möglichkeit der Wiederholung gewonnene Erkenntnisse unmittelbar eingesetzt werden können (Huth, 2004), was sich positiv auf die Motivation und Emotionen der Schüler*innen auswirken kann (B. Jacobs, 2008). Lob als Form von Feedback gilt als umstritten, da es (meist) keine Informationen über die Aufgabe enthält (Hattie & Timperley, 2007). Dennoch lassen Studienergebnisse auf einen möglichen positiven Einfluss von Lob auf die intrinsische Motivation schließen (Gao, Shuang & Zhang, Xiangkui, 2016) vor allem, wenn das Lob auf einer digitalen Lernplattform durch eine animierte Figur übermittelt wird (Mumm & Mutlu, 2011).

Neben der Gestaltung von Feedback deuten Studienergebnisse auf den Einfluss weiterer Faktoren auf Motivation und Emotionen hin. Eine Studie von Reinhold et al. (2021), in der Lernende mit einem eBook (ähnlich einer Lernplattform) an Bruchrechenaufgaben arbeiteten, weist beispielsweise auf einen Zusammenhang von Angst, Selbstkonzept und Freude mit der intrinsischen Motivation, dem situativen Interesse sowie der Belastung hin.

Zusammenfassung

Ziel von Feedback ist die Schließung der Lücke zwischen aktuellem Wissen und dem Lernziel (Kapitel 3.1). Auch wenn empirische Studien Feedback als einen der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Leistung herausstellen, entfaltet sich die Wirksamkeit von Feedback nicht immer. Es gilt daher herauszufinden, wann Feedback lernförderlich ist. Studienergebnisse deuten auf verschiedene Faktoren hin, die die Wirksamkeit beeinflussen. Dazu zählen zum Beispiel der Zweck, zu dem Feedback eingesetzt wird (summativ vs. formativ; Kapitel 3), die Komplexität von Feedback (elaboriertes Feedback scheint weniger komplexen Feedbackarten überlegen zu sein; Kapitel 3.2.1) und der Zeitpunkt, zu dem Feedback präsentiert wird (direktes vs. verzögertes Feedback, Kapitel 3.2.2).

Aber auch andere Faktoren wie das Vorwissen von Lernenden (Kapitel 3.3.1) und die Feedbackwahrnehmung (Kapitel 3.3.2) scheinen einen Einfluss auf die Wirksamkeit von Feedback zu haben. So profitieren besonders Lernende mit keinem oder geringem Vorwissen von elaboriertem Feedback, wohingegen zu ausführliches und direktes Feedback Lernende mit mehr Vorwissen in ihrer Leistungsentwicklung kaum unterstützt oder sogar behindert. Außerdem sollte das Feedback als positiv wahrgenommen werden, damit es einen Einfluss auf den Lernerfolg hat.

Das hängt unter anderem damit zusammen, dass Feedback erst wenn es als positiv wahrgenommen wird, auch genutzt wird. Einflussfaktoren auf die Feedbacknutzung lassen sich in internale sowie externale Kategorien ordnen (Kapitel 3.4.1).

Neben der Förderung kognitiver Leistungen (wie der Befähigung zur Bruchrechnung) liegt die Verantwortung von Schule ebenfalls darin, Lernende motivational und emotional auszubilden. Dabei scheint eine positivere Wahrnehmung mit höherer Motivation und positiveren Emotionen einherzugehen. Außerdem deuten Studienergebnisse auf eine potenzielle Stärkung von Motivation und Emotionen durch Lernplattformen hin (Kapitel 3.5).

Begriffserklärungen

Feedback: Feedback ist die Informationen zum Leistungsstand der Lernenden mit dem Ziel der Schließung einer Lücke zwischen diesem aktuellen Lernstand und dem Lernziel.

Motivation und Emotionen: Motivation wird als Antrieb zur Handlungsausführung definiert. Emotionen liegen je nach Theorie unterschiedliche Definitionen zugrunde. Emotionen können sich unter anderem als (kognitive) Bewertungen von Situationen beschreiben lassen. Motivation und Emotionen werden für diese Arbeit über die intrinsische Motivation, das situative Interesse und die Belastung operationalisiert.

Zusammenhänge zentraler Variablen

Es ist davon auszugehen, dass Einstellungen und Kompetenzen zu digitalen Medien die Wahrnehmung sowie die Nutzung von Feedback auf digitalen Lernplattformen beeinflussen.

Generell konnte bereits belegt werden, dass Feedback potenziell Einfluss auf die Bruchrechenleistung von Schüler*innen nehmen kann. Dabei scheinen das Vorwissen sowie die Wahrnehmung des Feedbacks auf die Ausprägung der Wirkung Einfluss zu nehmen.

Auf die Wahrnehmung des Feedbacks wirken wiederum emotionale Variablen sowie das Vorwissen der Lernenden.

Die Wahrnehmung des Feedbacks selbst steht unter anderem in einem Zusammenhang mit der Feedbacknutzung. Neben der Wahrnehmung des Feedbacks beeinflussen sowohl das Vorwissen sowie motivational-emotionale Variablen die Feedbacknutzung.

Die Feedbacknutzung wiederum beeinflusst die Bruchrechenleistung sowie Motivation und Emotionen.

Motivation und Emotionen haben einen Einfluss auf die Leistung und werden selber durch die Feedbackwahrnehmung und motivational-emotionale Variablen beeinflusst.

Abschnitt C Methode

Die Relevanz des Beherrschens der Bruchrechnung für schulischen und außerschulischen Erfolg wurde in Abschnitt B, Kapitel 1 dieser Arbeit dargestellt. Um erfolgreich mit Bruchzahlen umgehen zu können, müssen Schüler*innen allerdings über konzeptuelles Wissen („Wissen, warum“) sowie prozedurales Wissen („Wissen, wie“) zur Bruchrechnung verfügen (vgl. Kapitel 1.2). Vorgebracht durch den „Digitalisierungsdruck“ von Schule und empirischen Erkenntnissen zum Potenzial digitaler Medien, die in Teilen sehr vielversprechend, aber auch inkonsistent erscheinen, werden Lehr-Lern-Prozesse – und so auch das Lehren und Lernen der Bruchrechnung – durch digitale Lernplattformen unterstützt. Das Potenzial digitaler Lernplattformen wird insbesondere in dem automatisierten Feedback gesehen (vgl. Abschnitt B, Kapitel 2.3). Mittlerweile liegt eine Vielzahl an Studien zum Einfluss von Feedback auf die Leistung sowie die Motivation und Emotionen von Schüler*innen vor. Die empirischen Erkenntnisse sind jedoch, wie schon hinsichtlich digitaler Medien, von hoher Varianz geprägt. Einst ging die Diskussion um Feedback vor allem von der Frage aus, ob Feedback wirksam sei. Im Laufe der Zeit entwickelte sich die Frage, wann Feedback seine Wirksamkeit entfaltet. Diesbezüglich wurden verschiedene Faktoren theoretisch und empirisch identifiziert, die einen (möglichen) Einfluss auf die Wirksamkeit von Feedback haben (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3).

1 Zentrale Forschungsfragen und Wirkmodelle

Basierend auf den in Abschnitt B dargelegten theoretischen Diskussionen und empirischen Befunden soll eine Auseinandersetzung mit den Potenzialen von Feedback auf digitalen Lernplattformen stattfinden. Mit speziellem Fokus auf die Perspektive sowie das Verhalten der Lernenden – erfasst durch deren Feedbackwahrnehmung und -nutzung – soll ein Beitrag zur Diskussion um die Bedeutung digital-gestützten Feedbacks in Lehr-Lern-Situationen ohne menschliche Tutor*innen geleistet werden. Hierzu wird den nachfolgenden, allgemein formulierten Forschungsfragen sowie dem in Abbildung 15 zentralen Wirkmodell nachgegangen.

Forschungsfrage 1: (Inwiefern) Unterscheiden sich die Bruchrechenleistung (Mzp 2), die Motivation und Emotionen sowie die Feedbackwahrnehmung von Lernenden aufgrund unterschiedlich gestalteten Feedbacks?

Lernerfolg wird meist zwar ausschließlich mit der Förderung von Leistung assoziiert, soll in dieser Arbeit allerdings auch die Steigerung von Motivation und positiven Emotionen der Lernenden miteinbeziehen. Ausgehend von der Auseinandersetzung mit Feedback im Allgemeinen und den unterschiedlichen Gestaltungsmöglichkeiten von Feedback im Speziellen ist von einem

potenziellen Einfluss von Feedback sowohl auf die Leistung von Lernenden als auch die Motivation und Emotionen auszugehen. So erscheint elaboriertes und direktes Feedback im Vergleich zu einfachem und verzögertem Feedback in empirischen Analysen als lernwirksamer (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.2). Die Überlegenheit elaborierten und direkten Feedbacks gilt insbesondere für Lernende mit keinem oder geringem Vorwissen (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.3.1). Bezüglich der Diskussion um den Einfluss von Feedback auf Motivation und Emotionen von Schüler*innen lässt sich ein heterogenes Bild der Ergebnisse verzeichnen. Dennoch scheint Feedback (auf digitalen Lernplattformen) das Potenzial zu besitzen, Motivation und Emotionen positiv zu fördern. Von einem positiven Einfluss auf Motivation und Emotionen ist insbesondere für elaboriertes Feedback im Vergleich zu einfacherem Feedback auszugehen (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.5).

Im Kontext von Auseinandersetzungen mit der Perspektive von Schüler*innen lässt sich herausstellen, dass aufgrund mangelnder Fokussierung über die Schülersicht speziell in der Feedbackforschung nur wenig bekannt ist. Empirische Ergebnisse und theoretische Diskussionen deuten jedoch darauf hin, dass die Feedbackwahrnehmung durchaus als relevante Variable innerhalb von Lehr-Lern-Prozessen angesehen werden sollte. Diesbezüglich gilt es zu klären, inwieweit unterschiedlich gestaltetes Feedback die Wahrnehmung eben diesen Feedbacks durch die Lernenden prägt. Erste Studien zur Feedbackwahrnehmung scheinen darauf hinzudeuten, dass Lernende elaboriertes Feedback im Vergleich zu einfacherem Feedback als positiver wahrzunehmen, solange dieses kognitiv nicht zu anspruchsvoll ist (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.3.2).

Forschungsfrage 2: (Inwiefern) Haben Lernenden- und Feedbackeigenschaften einen Einfluss auf die Feedbackwahrnehmung sowie Feedbacknutzung von Lernenden?

Das Potenzial der Feedbackwahrnehmung wurde bereits angesprochen. Ähnliches lässt sich für die Feedbacknutzung feststellen. Bereits bezüglich der Auseinandersetzung mit der Definition von Feedback wird die Bedeutung der Feedbacknutzung deutlich, denn eine „einfache“ Information wird erst zu Feedback, wenn diese auch, beispielsweise zur Fehlerkorrektur, genutzt wird (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.1). Darüber hinaus bestätigen Studienergebnisse, dass die Feedbacknutzung eine relevante Variable für die Leistung von Schüler*innen darstellen kann (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.4.1). Wodurch die Wahrnehmung und Nutzung von Feedback bestimmt werden, ist allerdings noch wenig erforscht und bisherige Forschungsergebnisse zeigen sich als heterogen.

Forschungsfrage 3: Mediiert die Feedbackwahrnehmung den Effekt von Feedback auf die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen von Lernenden?

Auch wenn die Feedbackwahrnehmung durch die Lernenden lange innerhalb von Forschungsdesigns keine Berücksichtigung fand, herrscht bereits seit längerem ein Diskussion um die Bedeutung der Feedbackwahrnehmung vor. Neuere Studienergebnisse scheinen zu bestätigen, dass die Feedbackwahrnehmung relevant für eine gute Leistung sowie positive Motivation und Emotionen ist. Aktuelle Feedbackforschung greift die Wahrnehmung des Feedbacks immer häufiger als Mediator des Effekts von Feedback auf den Lernerfolg auf (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.3.2). Allerdings erscheint die Studienlage zu diesem Thema als sehr gering und heterogen. Daher soll auch diese Arbeit einen Beitrag zur Untersuchung der Rolle der Feedbackwahrnehmung leisten.

Forschungsfrage 4: (Inwiefern) Beeinflusst die Feedbacknutzung die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen von Lernenden?

Die aktive Nutzung von Feedback gilt als einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf den Lernerfolg, denn erst wenn sich Lernende mit dem Feedback auseinandersetzen, kann die Lücke zwischen aktuellem Lernstand und Zielzustand verringert, bzw. geschlossen werden. Dabei steigert eine intensivere Feedbacknutzung die Leistung von Lernenden jedoch nicht zwangsläufig und nimmt nicht automatisch positiven Einfluss auf die Motivation und Emotionen. Ist das Feedback beispielsweise schlicht zu komplex, sind die Lernenden zwar gezwungen sich länger mit den Informationen auseinanderzusetzen, das Feedback schafft dennoch kaum Gelegenheit für die Lernenden ihr Verhalten anzupassen, was wiederum potenziell die Motivation senkt und negativ auf Emotionen wirkt (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.4). Die konträren Überlegungen zum potenziellen Einfluss der Feedbacknutzung sollen im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden.

Zentrales Wirkmodell

Abbildung 15 zeigt das aus den theoretischen Vorüberlegungen hervorgehende zentrale zu untersuchende Wirkmodell dieser Arbeit mit der Feedbackwahrnehmung und -nutzung als Mediatoren. Unter „Lernerfolg“ fallen sowohl die Leistung als auch die Motivation und Emotionen der Lernenden.

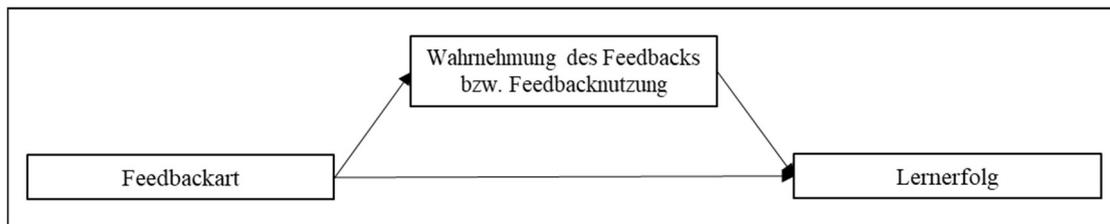


Abbildung 15: Zentrales zu untersuchendes Wirkmodell

2 Design

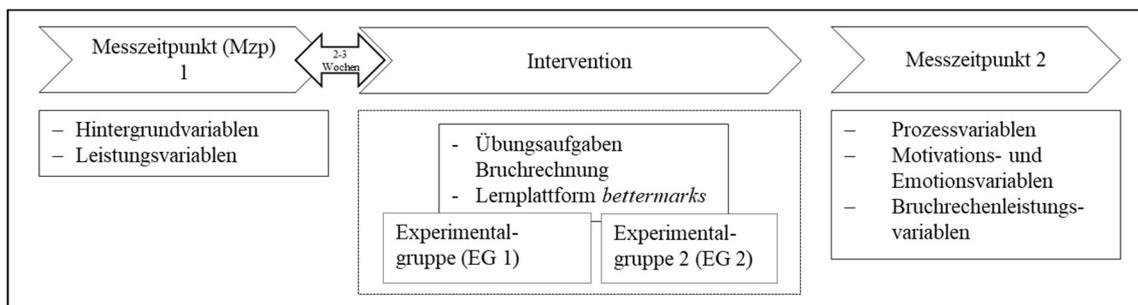


Abbildung 16: Design der experimentellen Laborstudie

Aufgrund der geringen Breite an Forschungsergebnissen sowie deren Inkonsistenz hinsichtlich der Ergebnisse zur Wirksamkeit von Feedback auf digitalen Lernplattformen scheint die Durchführung weiterer Studien ebengenau zu dem Thema „Feedback auf digitalen Lernplattformen“ als besonders relevant. Daher wurde eine Interventionsstudie mit Siebtklässler*innen unter Laborbedingungen als eine Grundlagenforschung zum besseren Verstehen lernwirksamer Implementation digitaler Lernplattformen in Lehr-Lern-Prozesse durchgeführt. Das Design der Studie ist in Abbildung 16 dargestellt und wird nachfolgend beschrieben.

Das Design setzt sich aus einem ersten Messzeitpunkt (Mzp) sowie einer Intervention mit direkt anschließendem zweiten Mzp zusammen. Die Erhebungen fanden jeweils in den Räumlichkeiten der Schulen statt. Ein erster Mzp mit einer Dauer von 90 Minuten gilt der Erfassung verschiedener Hintergrund- sowie Leistungsvariablen der Schüler*innen. Dieser erste Mzp diente als Grundlage für eine parallelisierte und randomisierte Zuordnung der Proband*innen, um zwei vergleichbare Experimentalgruppen (EG) zu generieren. Empirische Erkenntnisse legen den Einfluss verschiedener Variablen auf die (mathematische) Leistung von Lernenden nahe. Um den Einfluss des Feedbacks mit möglichst wenig Störvariablen untersuchen zu können, soll auf eben solche Variablen kontrolliert werden. Die Parallelisierung von jeweils zwei Schüler*innen erfolgte auf Grundlage des Bruchrechenleistung zu Mzp 1 (z. B. Narciss & Huth, 2004; Fyfe & Rittle-Johnson, 2016), neben diesem werden auch die Lesefähigkeiten (Bos et al., 2012; Jordan et al., 2013; Singer & Strasser, 2017), die allgemeinen kognitiven Fähigkeiten

(Jordan et al., 2013), das Geschlecht (Mullis et al., 2016) der Proband*innen sowie die Klassenzugehörigkeit berücksichtigt. So konnte innerhalb jeder Schule jedem Schüler/jeder Schülerin ein zweiter Schüler/eine zweite Schülerin mit derselben oder sehr ähnlicher Leistung im Bruchrechentest aus Mzp 1 zugeordnet werden. Da die Lesefähigkeiten und allgemeinen kognitiven Fähigkeiten potenziell Einflussfaktoren auf den Lernerfolg darstellen, erschien eine ähnliche Verteilung dieser beiden Variablen zwischen den Gruppen als sinnvoll. Um die EG auch hinsichtlich der Geschlechterverteilung vergleichbar zu machen, erfolgte, wenn möglich, eine Zuordnung gleich geschlechtlicher Proband*innen. Zur Minimierung von Lehrkräfteeffekten wurde die Zuteilung innerhalb der Klassen die Größen der EG ähnlich gestaltet. An die Parallelisierung anschließend wurden die zwei Schüler*innen zufällig je einer der beiden Experimentalgruppen zugeordnet.

Rund zwei bis drei Wochen nach dem ersten Mzp erfolgte ein zweiter Schulbesuch, innerhalb dessen die Intervention und der direkt anschließende Mzp 2 stattfand. Die Dauer von Intervention und Mzp 2 belief sich zusammen auf 90 Minuten. Die generierten EG arbeiteten im Zuge der Intervention in nach Gruppen getrennten Räumlichkeiten an denselben Übungsaufgaben zur Bruchrechnung auf der eingesetzten Lernplattform an iPads. Um alle Schüler*innen mit den technischen Begebenheiten vertraut zu machen und eventuelle Fragen zu klären, waren den Übungsaufgaben drei Beispielaufgaben vorgeschaltet, die gemeinsam mit der Testleitung bearbeitet wurden. Die Intervention beinhaltete 20 Aufgaben zur Bruchrechnung, die innerhalb von 30 Minuten zu bearbeiten waren. Der Zeitrahmen für die Intervention ergab sich aus der durchschnittlichen Stundenzahl von 2,6 Stunden/Woche, die Schüler*innen für Hausaufgaben – welche als typische Repräsentanten von Selbstlernphasen gesehen werden – im Fach Mathematik aufbringen (Komorek, 2006). Da von einer Fünf-Tage-Woche ausgegangen wird, ergibt sich eine durchschnittliche Bearbeitungszeit der Mathematikhausaufgaben von rund 30 Minuten. Lernende, die mit der Bearbeitung früher abschlossen, erhielten sechs Teilaufgaben der VERA-8 Deutsch Aufgabe „Seidenstraße“ (Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen, o. D.; vgl. Anhang 1), um eine gleichwertige kognitive Belastung aufrechtzuerhalten, ohne das mathematische Wissen potenziell zu fördern. Die Dauer der Intervention, die eingesetzten Aufgaben sowie das allgemeine Setting waren zwischen den Gruppen gleich. Unterschieden wurden die beiden EG in dem von der Lernplattform bereitgestellten Feedback. Während EG 1 als Abbild „typischer“ Selbstlernphasen (bspw. die Durchführung von Hausaufgaben) diente und erst am Ende aller Aufgaben das Feedback erhielt, welche Aufgaben richtig und welche falsch gelöst wurden, erhielt EG 2 elaboriertes Feedback beispielsweise in Form von Hilfen (mehr zu den beiden Feedbackbedingungen vgl. Kapitel 4.2). Zur Umsetzung des Feedbacks wurde den

Schüler*innen aus EG 1 freigestellt, ob sie falsch bearbeitete Aufgaben noch einmal lösen mochten.

Im Anschluss an die Intervention erfolgte ein zweiter Mzp in Form eines Fragebogens und eines Bruchrechentests. Innerhalb des Mzp 2 wurden Prozessvariablen, emotionale und motivationale Variablen sowie die Bruchrechenleistung erfasst.

Auch wenn die Fachlehrkräfte explizit darauf hingewiesen wurden, keine Wiederholung der Bruchrechnung zwischen den beiden Mzp durchzuführen, wurde zur Sicherstellung der Einhaltung eine an die Intervention stattfindende Lehrkräftebefragung durchgeführt. Tatsächlich erschloss sich aus dieser Befragung für eine Klasse die Wiederholung der Bruchrechnung zwischen den Mzp. Welche Konsequenzen das für die Analysen hatte, wird an späterer Stelle erläutert.

Wie die Ausführungen zum Design zeigen, handelt es sich bei der Studie um kein klassisches klinisches Experiment. Stattdessen liegt ein Schwerpunkt der Arbeit aufgrund der Verordnung des übergeordneten Projekts in der schulischen Praxis auf der ökologischen Validität des Designs. Das bedeutet konkret: Obwohl es sich nicht um Unterrichtsforschung handelt, orientiert sich die Intervention an Phasen des schulischen Lernens, die sich in der Praxis verorten lassen. Bei diesen Phasen handelt es sich um Selbstlernmomente beispielsweise vor einer Klausur oder bei Hausaufgaben, in denen den Lernenden nur selten menschliche Tutor*innen (z. B. in Form von Lehrkräften) unterstützend zur Seite stehen.

Nach Entwicklung des Studiendesigns wurde das Design im Rahmen einer Pilotierung in zwei siebten Klassen ($N = 32$) erprobt, um vor allem die zeitliche Planung zu konkretisieren. Die Pilotierung half insbesondere bei der Einschätzung der Bearbeitungsdauer der Fragebögen und Intervention sowie bei der schülergerechten Formulierung von Erklärungen der Testleitung. Die Pilotierungsstudie ergab eine gute Passung zwischen Aufgabenanzahl und zeitlicher Zielsetzung.

3 Stichprobe

Insgesamt haben $N = 137$ Siebtklässler*innen^{7,8} von drei Gemeinschaftsschulen aus Schleswig-Holstein ($n_{Klassen} = 7$) und einer Oberschule aus Niedersachsen ($n_{Klassen} = 2$) an beiden Mzp

⁷ Es handelt sich um die Anzahl an Schüler*innen, die in die Analysen einbezogen wurden. Informationen zu ausgeschlossenen Lernenden sind Kapitel 6 zu entnehmen.

⁸ Poweranalysen für die geplanten Analysen ergaben, dass geschätzt zwischen 45 (für gepaarte t-Tests) und 176 (für Regressionsanalysen) Proband*innen pro Versuchsgruppe bei erwarteten niedrigen Effektstärken benötigt werden, um eine statistische Power von .80 zu erreichen (Hemmerich, 2016). Für eine angemessene statistische

teilgenommen. Die Schüler*innen waren im Mittel 12,6 Jahre alt, $n = 63$ gaben an weiblich, $n = 70$ gaben an männlich zu sein, $n = 4$ machten keine Angabe zu ihrem Geschlecht.

Da die Fachanforderungen für Mathematik des Landes Schleswig-Holstein (Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein, 2014) sowie das Kerncurriculum Niedersachsen (Niedersächsisches Kultusministerium, 2021) die Bruchrechnung in Klasse 5 und 6 vorsieht, war davon auszugehen, dass alle Teilnehmenden bereits Bruchrechenfähigkeiten erworben hatten. Bereits erworbene Kompetenzen im Bereich der Bruchrechnung waren für die vorliegende Studie wünschenswert, da das primäre Ziel digitaler Lernplattformen nicht im Vermitteln neuen Wissens, sondern im Festigen bereits erworbener Kompetenzen liegt. Nach Rücksprache mit den Fachlehrkräften ließ sich jedoch ausmachen, dass die Vermittlung der Bruchrechnung zu großen Teilen in Zeiten des pandemiebedingten Homeschooling stattfand und dass somit von einer Population mit geringem Vorwissen zur Bruchrechnung auszugehen war.

Die Stichprobe lässt sich im Weiteren als recht heterogen hinsichtlich des Migrationshintergrunds beschreiben: Von den 137 Proband*innen gaben acht (ca. 6 %) an, dass ein Elternteil in einem anderen Land als Deutschland geboren wurde, 21 (ca. 15 %), dass beide Eltern aus einem anderen Land stammen und 20 (ca. 15 %) Schüler*innen wurden neben ihren Eltern ebenfalls nicht in Deutschland geboren. Unter den Studienteilnehmenden sprechen laut eigenen Angaben 93 (ca. 68 %) immer, 28 (ca. 20 %) fast immer, 13 (ca. 9 %) manchmal und 3 (ca. 2 %) nie zuhause deutsch.

4 Intervention

Zur Untersuchung zweier unterschiedlicher Feedbackarten hinsichtlich deren Wirkung auf den Lernerfolg, also die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen, und zur Untersuchung der Feedbackwahrnehmung und des Feedbacknutzungsverhaltens, arbeiteten Schüler*innen in einer Laborsitzung an Aufgaben zur Bruchrechnung. Für einen genaueren Einblick in die Intervention sollen nachfolgend die Bruchrechenaufgaben, welche für beide EG von gleichem Inhalt waren, die unterschiedlichen Feedbackbedingungen sowie die eingesetzte Lernplattform genauer betrachtet werden.

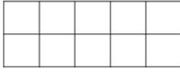
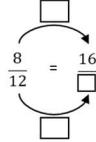
Power scheint die Stichprobengröße für einen Teil der geplanten Analysen zu klein, aufgrund der pandemischen Lage stellte sich die Rekrutierung weiterer Proband*innen jedoch als sehr schwierig heraus.

4.1 Bruchrechenaufgaben – potenzielle Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung

Zur Untersuchung, ob durch das Arbeiten mit digitalen Lernplattformen sowohl konzeptuelles als auch prozedurales Wissen zur Bruchrechnung gefördert werden kann, wurden Aufgaben für die Intervention ausgewählt, die orientiert an definitorischen Vorüberlegungen und bisherigen Operationalisierungen konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung die beiden Wissensfacetten potenziell fördern. So wurden Aufgaben ausgewählt, die vor allem die kognitiven Prozesse der Visualisierung (vor allem bezogen auf konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung) und Anwendung (vor allem bezogen auf prozedurales Wissen zur Bruchrechnung) ansprechen und einen der Inhalte des Kürzens und Erweiterns, des Umwandelns oder der Addition von Brüchen behandeln.

Tabelle 7 veranschaulicht die potenzielle Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens durch Beispielaufgaben der Intervention. Von jedem Aufgabentyp wurden zwei ähnliche Aufgaben – diese variierten lediglich in ihren Abbildungen oder Zahlen, die Aufgabenstellung blieb jedoch gleich – hintereinandergeschaltet, um den Schüler*innen eine Möglichkeit zur Anwendung erlangter Erkenntnisse beispielsweise durch das Feedback bereitzustellen. In Anhang 2 sind die Aufgaben der Intervention in der Bearbeitungsreihenfolge gesammelt dargestellt.

Tabelle 7: Ausgewählte, in der Intervention eingesetzte Aufgaben zur potenziellen Förderung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung, eigene Darstellungen nach bettermarks (2022)

Aufgaben zur potenziellen Förderung...	
Aufgabennr.	...konzeptuellen Wissens / ...prozeduralen Wissens
1 + 2	<p>Überlege, wie du die Unterteilung des Kreises vervollständigen kannst und gib an, welcher Anteil orange gefärbt ist.</p>  <p>des Kreises ist orange gefärbt.</p> <p> <input type="radio"/> $\frac{1}{2}$ <input type="radio"/> $\frac{1}{4}$ <input type="radio"/> $\frac{1}{6}$ <input type="radio"/> $\frac{1}{8}$ <input type="radio"/> $\frac{1}{10}$ <input type="radio"/> $\frac{1}{12}$ </p>
3 + 4	<p>Welcher Anteil des Rechtecks ist orange gefärbt?</p>  <p>des Rechtecks ist orange gefärbt.</p>
5 + 6	<p>Färbe $\frac{4}{10}$ des Rechtecks.</p> 
7 + 8	<p>Bestimme die Erweiterungszahl und vervollständige den Bruch.</p> 
9 + 10	<p>Vervollständige den Bruch.</p> $\frac{72}{80} = \frac{\square}{10}$
11 + 12	<p>Kürze den Bruch zu weit wie möglich.</p> $\frac{4}{14} = \frac{\square}{\square}$
13 + 14	<p>Wandle den unechten Bruch in eine gemischte Zahl um.</p> $\frac{23}{5} = \square$
15 + 16	<p>Wandle die gemischte Zahl in einen unechten Bruch um.</p> $1 \frac{1}{12} = \square$
17 + 18	<p>In welcher Darstellung ist der gleiche Anteil orange gefärbt?</p> 
19 + 20	<p>Berechne $\frac{1}{6} + \frac{2}{4}$. Bilde zuerst den Hauptnenner und addiere anschließend die Brüche.</p>

4.2 Feedbackbedingungen

Zwei EG arbeiteten mit verschiedenen Arten von Feedback: der Feedbackart „KR“ (EG 1) sowie elaborem Feedback („elabo“) (EG 2) ($n_{kor} = 70$, $n_{elabo} = 67^9$). Die Feedbackart „KR“, welche Information darüber liefert, ob die Aufgabenbearbeitung korrekt oder inkorrekt ist, wurde verzögert im Anschluss an die Bearbeitung aller Aufgaben präsentiert, während die EG, die elaboretes Feedback erhielt, im Bearbeitungsprozess vom Feedback Gebrauch machen konnte. Damit bewegt sich die EG 1 nah an einer „typischen“ Selbstlernsituation, im Rahmen derer die Schüler*innen meist eine Reihe von Aufgaben bearbeiten, ohne über die Korrektheit ihrer Bearbeitung informiert zu werden. Erst durch das Korrigieren durch die Lehrkraft erfahren die Lernenden, ob ihre Antworten korrekt oder inkorrekt sind. Das Feedback der EG 2 wiederum präsentiert aus theoretischer Sicht lernförderliches Feedback. Die genaue Gestaltung des Feedbacks beider Gruppen wird nachfolgend dargestellt.

4.2.1 EG 1 „KR“

Schüler*innen der EG 1 bearbeiteten zunächst alle Aufgaben der Intervention, bevor sie Feedback erhielten. Das bedeutet: Die Schüler*innen gaben ihre Lösung in das entsprechende Feld ein und gingen zur nächsten Aufgabe über, ohne direktes Feedback nach der Aufgabenbearbeitung zu erhalten. Ausnahme bildete bei der Intervention eine Aufgabe, die aus mehreren Teilschritten besteht. Bei dieser Aufgabe erfuhren die Lernenden, ob ihre Lösung der Zwischenschritte korrekt oder inkorrekt war und im Falle inkorrekt gelöster Aufgaben, um den nächsten Schritt bearbeiten zu können. Beim letzten Lösungsschritt, also der finalen Lösung der Aufgaben, erhielten die Lernenden kein Feedback mehr, sodass die Schüler*innen nicht direkt darüber informiert wurden, ob ihre Lösung richtig oder falsch war. Bei allen Aufgaben – und auch bei benötigten Teilschritten – war die Eingabe einer Lösung keine notwendige Voraussetzung, um zur nächsten Aufgabe zu gelangen. Bei einem leeren Lösungsfeld erschien allerdings ein Hinweis darauf, dass keine Lösung eingegeben wurde.

Am Ende aller bearbeiteten Aufgaben erfuhren die Lernenden durch eine tabellarische Aufstellung, welche Aufgaben korrekt und welche inkorrekt durch sie bearbeitet wurden. Außerdem wurde ihre Gesamtpunktzahl im Verhältnis zu allen möglich erreichbaren Punkten dargestellt (vgl. Abbildung 17). Die Lernenden der EG 1 erhielten also verzögertes Feedback.

⁹ Dieser Unterschied in der Gruppengröße lässt sich höchstwahrscheinlich durch folgenden Aspekt erklären: Aufgrund einer hohen Krankheitswelle nahmen nicht alle Lernenden, die bereits einer der beiden EG zugeteilt wurden, an der Intervention sowie dem zweiten Mzp teil. So konnte die geplante parallelisierte Gruppeneinteilung nicht vollumfänglich praktisch durchgeführt werden.

Dein Ergebnis: 30/54 Punkte.



✓ Aufgabe 1	✓ Aufgabe 2	✓ Aufgabe 3	✗ Aufgabe 4
✓ Aufgabe 5	✓ Aufgabe 6	✓ Aufgabe 7	✗ Aufgabe 8
✓ Aufgabe 9	✓ Aufgabe 10	✓ Aufgabe 11	✗ Aufgabe 12
✓ Aufgabe 13	✗ Aufgabe 14	✗ Aufgabe 15	✗ Aufgabe 16
✓ Aufgabe 17	✗ Aufgabe 18	✗ Aufgabe 19	✓ Aufgabe 20
✓ Aufgabe 21	✗ Aufgabe 22	✗ Aufgabe 23	

Abbildung 17: Beispielhaftes Feedback der EG 1 „KR“

Nach Beendigung aller Aufgaben wies die Testleitung die Teilnehmenden darauf hin, dass für sie die Möglichkeit bestehe, die fehlerhaften Aufgaben erneut zu bearbeiten. Wurde eine erneute Bearbeitung nicht gewünscht und war die geplante Zeit für die Intervention (= 30 Minuten) noch nicht abgelaufen, erhielten die Lernenden sechs Teilaufgaben der VERA-8 Deutsch Aufgabe „Seidenstraße“ (Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen o. D.) (vgl. Anhang 1), um die kognitive Anforderung aufrechtzuerhalten.

4.2.2 EG 2 „elabo“

Die EG 2 erhielt elaboriertes und direktes Feedback während des Bearbeitungsprozesses. Das Feedback bestand unter anderem aus folgenden Komponenten, welche auch in Abbildung 18 dargestellt sind:

Hilfen:

- Bei Bearbeitung der Aufgaben stehen den Schüler*innen jederzeit verschiedene Formen der Hilfe zur Verfügung

Nach Eingabe der korrekten Lösung:

- KR: Feedback, dass die eingetragene Schülerlösung korrekt ist + Lösungsbeispiel

Nach Eingabe der inkorrekten Lösung beim 1. Versuch:

- KR: Feedback, dass die eingetragene Schülerlösung inkorrekt ist
- KH: Hinweis auf die Hilfen (meist ein Tipp)
- Error flagging: Markierung, welcher Teil der Lösung inkorrekt ist
- MTF: Nach einem ersten Fehlversuch haben die Schüler*innen einen weiteren Versuch

Nach Eingabe der inkorrekten Lösung beim 2. Versuch:

- KR: Feedback, dass die eingetragene Schülerlösung inkorrekt ist
- KCR: Angabe der richtigen Lösung
- KH: in Form eines Lösungsbeispiels

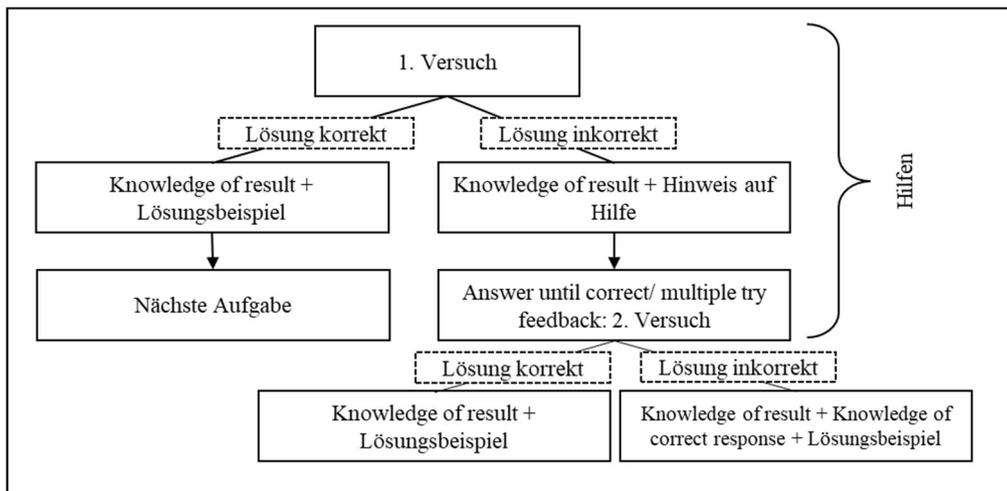


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Feedbackpräsentation der EG 2 „elabo“

Das dargestellte Feedback lässt sich unter Bezugnahme der Literatur (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.2.1) durchaus als elaboriert einordnen. Dabei stellen einfache Feedbackformen wie KR, error flagging oder MTF eine Grundlage elaborierten Feedbacks dar. Nachfolgend werden Feedbackkomponenten genauer beleuchtet, die das Feedback der eingesetzten Lernplattform als elaboriert klassifizieren lassen. Diese Komponenten sollen anhand der beispielhaften Aufgabe aus Abbildung 19 exemplarisch dargelegt werden.

Berechne $\frac{1}{6} + \frac{3}{4}$.
 Bilde zuerst den Hauptnenner und addiere anschließend die Brüche.

Abbildung 19: Beispielhafte Aufgabe der Intervention, eigene Darstellung nach bettermarks (2022)

- KM; Bugs/misconceptions: Feedback zur Art des Fehlers bzw. spezifischen Fehlern liefert die Lernplattform nicht für jede inkorrekte Lösung. Bei einzelnen „typischen“ Schülerfehlern erhalten die Lernenden jedoch eine Beschreibung, worin ihr Fehler lag. Als Beispiel lässt sich die Addition von Brüchen nennen. Ein häufiger Fehler ist die Addition nicht nur der Zähler, sondern auch der Nenner. Dies erkennt die Plattform und gibt einen konkreten Hinweis (vgl. Abbildung 20).

Bei der Addition von Brüchen musst du nur die Zähler addieren. Die Einteilung der Nenner bleibt gleich.

Abbildung 20: Beispielhaftes Feedback der Feedbackart KM bzw. bugs/misconceptions, eigene Darstellung nach bettermarks (2023)

- KTC: Die Lernplattform gibt insbesondere über die Hilfen Hinweise, welche Regeln bei der Bearbeitung der Aufgaben zu beachten sind.
- KC: Zu dieser Art des Feedbacks gehören nach Narciss (2006) sowohl Beispiele für Begriffe als auch Erläuterungen zu Begriffen. Die eingesetzte Lernplattform bietet diese Möglichkeiten für ausgewählte (Fach)Begriffe (z. B. Hauptnenner, Brüche).
- KH: Unter dieses Feedback fallen unter anderem Lösungsbeispiele. Dies bietet die Lernplattform zum einen unter dem Punkt „Hilfe“, zum anderen wird ein beispielhafter Lösungsprozess nach korrekter Bearbeitung der Aufgabe oder nach einem zweiten Fehlversuch präsentiert.
- Informative tutoring: Die laut Narciss und Huth (2004) elaborierteste Form des Feedbacks gibt Feedback zur Überprüfung, Fehlermeldungen sowie strategische Hinweise zum weiteren Vorgehen jedoch nicht die korrekte Lösung. Dies erfüllt die eingesetzte Lernplattform in dem Sinne, dass sie bei einem Fehlversuch nicht die korrekte Antwort rückmeldet, stattdessen aber auf die angebotenen Hilfen hinweist.

Hilfen bzw. „hints“ benennt Shute (2008) explizit als Teil elaborierten Feedbacks. Auf diese Hilfen soll tiefer gehend eingegangen werden, da sie innerhalb der Lernplattform einen großen Teil des Feedbacks ausmachen. Die Lernplattform bietet vier verschiedene Arten von Hilfen an:

(1) Definitionen

Die blaue Schrift einzelner Begriffe weist auf hinterlegte Definition, also eine Erklärung des jeweiligen Begriffs, hin. Diese sind unterschiedlich aufgebaut und können neben verbalen Erklärungen auch Abbildungen und/oder Lösungsbeispiele enthalten (vgl. Abbildung 21). Theoretischen Ausführungen zum Feedback folgend, lassen sich die Definitionen der elaborierten Feedbackart KC zuordnen.

Der Hauptnenner ist das kleinste gemeinsame Vielfache (kgV) der einzelnen Nenner. Der Hauptnenner wird genutzt, um ungleichnamige Brüche addieren und subtrahieren zu können.

Beispiel
Der Hauptnenner bei den Nennern 3 und 4 ist 12.

$$\frac{2}{3} + \frac{1}{4} = \frac{8}{12} + \frac{2}{12} = \frac{11}{12}$$

Abbildung 21: Beispielhafte Definition als Feedbackform der eingesetzten Lernplattform, eigene Darstellung nach bettermarks (2023)

(2) Tipp zeigen

Neben den Definitionen sind drei verschiedene Arten von Hilfen durch ein Hilfesymbol am oberen rechten Bildschirmrand explizit als solche gekennzeichnet. Zu diesen Hilfen gehört ein Tipp. Tipps bestehen meist aus einem Satz. Bei einzelnen Aufgaben kann auch eine Abbildung dahinter verborgen sein. Tipps lassen sich eher als eine verbale Beschreibung des Vorgehens zur Lösungsfindung verstehen. Potenziell zielen die Tipps also eher auf eine Förderung des prozeduralen Wissens ab (vgl. Abbildung 22).

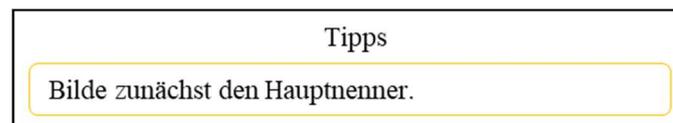


Abbildung 22: Beispielhafter Tipp als Feedbackform der eingesetzten Lernplattform, eigene Darstellung nach bettermarks (2023)

(3) Nachschlagen

Die als Nachschlagen benannte Hilfe fällt im Gegensatz zum Tipp deutlich ausführlicher und komplexer aus. Meist beinhaltet das Nachschlagen einleitende Hinweise zur Bearbeitung der Aufgabe und zeigt dann eine oder mehrere der zu bearbeitenden Aufgabe ähnliche Beispielaufgaben inklusive Bearbeitung und Lösung. Meist werden die Ausführungen durch Abbildungen illustriert. Neben der potenziellen Förderung prozeduralen Wissens beinhaltet das Nachschlagen auch Aspekte zur Förderung des konzeptuellen Wissens (vgl. Abbildung 23).

Nachschlagen

Addition ungleichnamiger Brüche

Ungleichnamige Brüche müssen vor dem Addieren gleichnamig gemacht werden. Du erweiterst am einfachsten auf den Hauptnenner

Beispiel

Aufgabe
Rechne aus: $\frac{3}{4} + \frac{1}{6}$

Lösung
Addieren:
 $\frac{3}{4} + \frac{1}{6} = \frac{9}{12} + \frac{2}{12} = \frac{11}{12}$

Erweitere auf den Hauptnenner 12: $\frac{3}{4} = \frac{9}{12}$ $\frac{1}{6} = \frac{2}{12}$

Addiere nur die Zähler: $9 + 2 = 11$. Der Nenner 12 bleibt unverändert.

Abbildung 23: Beispielhaftes Nachschlagen als Feedbackform der eingesetzten Lernplattform, eigene Darstellung nach bettermarks (2023)

(4) Lösung zeigen

Als weitere Option wird den Lernenden angeboten, sich die korrekte Lösung anzeigen zu lassen. Neben der korrekten Antwort beinhaltet das Feedback einen beispielhaften Lösungsweg. Durch die Präsentation des beispielhaften Lösungswegs lässt sich die Feedbackkomponente „Lösung zeigen“ unter Bezugnahme der Literatur als KH einordnen (vgl. Abbildung 24).

Lösung

$$\frac{1}{6} + \frac{3}{4} = \frac{11}{12}$$

Lösungsweg

Im ersten Schritt bringst du $\frac{1}{6}$ und $\frac{3}{4}$ auf ihren Hauptnenner 12.

$\frac{1}{6} = \frac{2}{12}$ $\frac{3}{4} = \frac{9}{12}$

Jetzt kannst du die Zähler addieren.

Also $\frac{2}{12} + \frac{9}{12} = \frac{11}{12}$

Abbildung 24: Beispielhafter Lösungsweg als Feedbackform der eingesetzten Lernplattform, eigene Darstellung nach bettermarks (2023)

Vorangegangene Ausführungen zeigen, dass sich das von der Lernplattform bereitgestellte Feedback an mindestens zwei der drei Fragen zur effektiven Feedbackgestaltung nach Hattie und Timperley (2007) orientiert. Durch das Feedback, ob eine Antwort korrekt oder inkorrekt bearbeitet wurde, wird den Lernenden aufgezeigt, „wie sie vorankommen“ (feed up). Die Hilfen bieten eine Möglichkeit, weitere Schritte in der Aufgabenbearbeitung einzuleiten und damit eine potenzielle Reduzierung der Diskrepanz zwischen Lernstand und Ziel zu erreichen (feed forward).

4.3 Eingesetzte Lernplattform

Die Lernplattform *bettermarks*¹⁰ wurde durch vorweg formulierte Kriterien (z. B. passendes Angebot an Aufgaben zur Bruchrechnung) sowie aufgrund der aus lerntheoretischer Sicht effektiven Feedbackmerkmale ausgewählt. Ein weiterer Auswahlgrund lag in der weiten Verbreitung der Lernplattform, denn: Einige Bundesländer (darunter auch Niedersachsen) schlossen

¹⁰ Zwischen dem für die Lernplattform verantwortlichen Unternehmen und der Autorin oder anderen an dieser Arbeit beteiligten Personen besteht kein kooperatives Verhältnis.

als Reaktion auf die Pandemie und den damit einhergehenden zeitweise eintretenden Schulschließungen einen Kooperationsvertrag mit der Lernplattform ab. Erst im Januar 2023 gab das Niedersächsische Kultusministerium bekannt, Schulen weiterhin durch die kostenfreie Bereitstellung von Lizenzen im Rahmen des Programms „Startklar in die Zukunft“ zu unterstützen. So wird neben anderen Lernplattformen die eingesetzte Plattform bis mindestens Mitte 2026 durch das Kultusministerium Lehrkräften kostenfrei zur Verfügung gestellt (Niedersächsisches Kultusministerium et al., 2023). Insbesondere durch diese Kooperation einzelner Länder mit den Betreibenden der Lernplattform findet diese national aber auch international weite Verbreitung (Weich et al., 2021).

4.3.1 Erkenntnisse zur Qualität der Lernplattform

Die Lernplattform wird durch unterschiedliche Ministerien gefördert und in Schule eingesetzt, allerdings liegen nur begrenzt empirische Daten zur Wirksamkeit der Lernplattform vor. Wie bereits Thurm und Graewert (2022) feststellten, wurde lediglich eine Studie zu der Lernplattform in einem Journal mit Peer-Review veröffentlicht. Scharnagl et al. (2014) untersuchten die Leistung von Sechstklässler*innen durch das Arbeiten mit der Lernplattform im Themenbereich Addition und Subtraktion von Brüchen. Während die Kontrollgruppe das Thema wie üblich behandelte, also ohne Verwendung der Lernplattform, wurde der Lehr-Lern-Prozess der EG durch die Lernplattform unterstützt. Dabei waren die Lehrkräfte angehalten, die Lernplattform so häufig wie möglich zu nutzen. Eine genaue Vorgabe zur Nutzungsdauer oder -häufigkeit erhielten die Lehrkräfte allerdings nicht. Ziel der Erhebung von Scharnagl et al. (2014) war unter anderem zu untersuchen, ob die Lernenden der EG durch den Einsatz der Lernplattform im Vergleich zu der Kontrollgruppe bessere Ergebnisse im Leistungstest erzielten und ob die Ergebnisse hinsichtlich der Leistung durch die Nutzungsdauer moderiert wurden. Ergebnisse zeigten keinen Unterschied im Posttest zwischen der Experimental- und Kontrollgruppe in den Schülerleistungen. Dafür konnte für die Experimentalgruppe, welche mit der Lernplattform arbeitete, eine signifikante Verbesserung vom Prä- zum Posttest, besonders für leistungsstarke Schüler*innen, gefunden werden. Dies steht im Kontrast zu aktuellen empirischen Erkenntnissen, die eine höhere Wirksamkeit für direktes und elaboriertes Feedback für Lernende mit keinem oder geringem Vorwissen vorhersagen (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.3.1). Wieso besonders leistungsstarke Schüler*innen von der Intervention mit der Lernplattform profitieren, klärte die Studie von Scharnagl et al. (2014) nicht. Außerdem schien die Leistungssteigerung der Schüler*innen der EG von der Einsatzdauer der Lernplattform abhängig zu sein.

Als eine von mehreren Lernplattformen beurteilte Stein (2015) die eingesetzte Lernplattform hinsichtlich des Themenbereiches „Bruchrechnung“ anhand eines selbstentwickelten Kategoriensystems, welches beispielsweise den Aufbau des Assessmentsystems und den Vorgang der Aufgabenauswahl einbezieht, wobei die eingesetzte Lernplattform in der summativen Beurteilung im Vergleich zu anderen Lernplattformen deutlich besser bewertet wurde. Eine Beurteilung der Aufgabenqualität fand jedoch nicht statt. Besonders als Reaktion auf fehlende bzw. mangelnde empirische Daten zur Qualität von Aufgaben aus Lernplattformen entwickelten Thurm und Graewert (2022) ein Kodierschema anhand dessen unter anderem Aufgaben zur Bruchrechnung verschiedener mathematikbezogener Lernplattformen – darunter auch der eingesetzten Lernplattform – analysiert wurden. An dieser Stelle werden ausgewählte Ergebnisse dargestellt:

- Über alle Lernplattformen hinweg ist außermathematisches und innermathematisches Modellieren sowie mathematisches Argumentieren wenig bis gar nicht gefordert.
- Der Gebrauch mathematischer Darstellungen ist für die Bruchrechnung wenig gefordert, besonders wenig wird der Wechsel zwischen Darstellungen gefordert.
- Die eingesetzte Lernplattform implementiert als einzige Plattform zu knapp 10 % begriffliche Aufgaben.
- Die eingesetzte Lernplattform stellt in Teilen adaptives Feedback bereit.

Die Autor*innen schlossen zur Qualität der Aufgaben mit dem Fazit:

Die Aufgabenanalyse [...] offenbart, dass die Gefahr besteht, dass die in den Plattformen realisierten Aufgaben nur einen begrenzten kognitiven Anspruch haben und vor allem ein isoliertes Training von Fertigkeiten fokussieren. [...] Es wäre daher insgesamt wichtig die Qualität der Aufgaben verstärkt in den Blick zu nehmen und auch Aufgaben zu implementieren, welche konzeptuelle und prozessbezogene Facetten mathematischen Wissens adressieren (Thurm & Graewert, 2022, S. 53-54).

Auch das Projekt, welchem sich diese Arbeit anschließt, identifizierte analog zu Thurm und Graewert eine Forschungslücke hinsichtlich der Qualität von Aufgaben auf digitalen Lernplattformen und entwickelte aufgrund dessen ein Kodierschema auf Grundlage theoretischer Erkenntnisse zum konzeptuellen und prozeduralen Wissen zur Bruchrechnung. Dieses Kodierschema wurde genutzt, um 5772 Aufgaben mit Bezug zum Thema „Brüche“ – ausgenommen Dezimalbrüche – hinsichtlich ihrer potenziellen Förderung konzeptuellen sowie prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung zu untersuchen (Stand der Aufgaben 08/2021). Zwei Raterinnen

(Masterstudierende des Lehramts Mathematik) kodierten die Aufgaben hinsichtlich drei konzeptueller (Verbalisierung, Visualisierung, Zahlenstrahl) und vier prozeduraler Kategorien (Erweitern/Kürzen, Relationen, Umwandeln, Grundrechenarten). Die Ergebnisse der Kodierung zeigten eine deutlich höhere Anzahl an Aufgaben zur potenziellen Förderung prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung. Konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung fand in den drei unterschiedlichen Kategorien zwar ebenfalls Zugang in den Aufgaben, wurde aber deutlich seltener eingefordert (Altenburger & Besser, 2023).

4.3.2 Klassifizierung der Lernplattform

Wie in Abschnitt B, Kapitel 2.1 dargestellt, lassen sich Lernplattformen in unterschiedliche Kategorien einordnen, wobei die Übergänge teilweise fließend sind und eine Lernplattform selten genau einer Kategorie zuzuordnen ist. An dieser Stelle sollen die Merkmale der komplexesten Art von Lernplattformen, den ITS, mit den Eigenschaften der eingesetzten Lernplattform abgeglichen werden. Als Fazit aus dem in Tabelle 8 dargestelltem Vergleich soll hier vorsichtig formuliert werden, dass die Lernplattform durchaus Kriterien eines ITS erfüllt, allerdings nicht als System zur Vermittlung von Wissen angesehen werden sollte. Ähnlich wie DPP vertieft die Lernplattform bereits erlangtes Wissen, geht dabei aber besonders hinsichtlich des implementierten Feedbacks über die Eigenschaften der meisten DPP hinaus. Die Lernplattform erweist sich daher als ein passendes Beispiel zur Verdeutlichung verschwimmender Grenzen zwischen Kategorien von Lernplattformen.

Tabelle 8: Darstellender Vergleich der Merkmale von ITS und den Eigenschaften der eingesetzten Lernplattform

Merkmale ITS	Eigenschaften der Lernplattform
Vertiefen und Üben, aber ebenso Wissensvermittlung (Hillmayr et al. 2017)	Die Lernplattform zielt weniger auf die Vermittlung neuen Wissens und mehr auf das Vertiefen und Üben ab. So sehen die Betreibenden selbst die Lehrkräfte als wissensvermittelnde Instanz und die Plattform zum Üben (bettermarks, 2023)
Förderung der Entwicklung problemlösenden Denkens (Schaumburg, 2017)	Die Lernplattform stellt keine „echten“ Problemlösaufgaben zur Verfügung
Adaptive Funktion (Schaumburg, 2017): Individuelles Arbeiten durch Aufgaben- und Feedbackpräsentation in Abhängigkeit vom Vorwissen und Antwortverhalten	In Teilen erkennt die Lernplattform typische Schülerfehler und gibt daran angepasstes (adaptives) Feedback. Außerdem stellt das System abhängig von der Lösungshäufigkeit zusätzliche Aufgaben unter dem Reiter „Wissenslücken“ bereit. Bei der Aufgabenbearbeitung werden die Aufgaben jedoch nicht unmittelbar an das Antwortverhalten angepasst.
Interaktives Arbeiten (Schaumburg, 2017): Dialog zwischen Lernenden und Lernplattform (Graesser et al., 2018) durch Feedback zu jedem Lösungsschritt (Petko, 2020)	Die Lernplattform bietet nach jedem Lösungsschritt Feedback an.
Elaboriertes Feedback (Faber et al., 2017; Maier et al., 2016; VanLehn, 2011)	Das Feedback lässt sich durchaus als elaboriert einordnen.

4.4 Verwendete elektronische Geräte

Den Lernenden stand während der Bearbeitung jeweils ein Apple iPad (7. Generation; Modellbezeichnung des Herstellers: MP2J2FD/A) mit einem 10,2 Zoll Bildschirm mit der vorinstallierten und geöffneten Applikation der eingesetzten Lernplattform zur Verfügung. Da die Lernplattform nur über eine Verbindung mit dem Internet funktioniert und in den Schulen nicht mit einem frei zugänglichen WLAN zu rechnen war, wurden zwei mobile WLAN-Router (Modell: Netgear Nighthawk M2 Mobile Router) angeschafft und jeder EG jeweils einer während der Intervention zur Verfügung gestellt.

5 Instrumente

Die zu den beiden Mzp eingesetzten Testinstrumente, welche in Tabelle 9 sowie Abbildung 25 zusammengefasst dargestellt sind, werden in der nachfolgenden Reihenfolge vorgestellt: Testinstrument zur Erfassung allgemeiner Hintergrundvariablen, Testinstrument zur Erfassung kognitiver Fähigkeiten, Testinstrument zur Erfassung von Lesefähigkeiten, Testinstrument zur Erfassung von Bruchrechenleistung, Testinstrument zur Erfassung der Motivation und Emotionen, Testinstrument zur Erfassung der Wahrnehmung von Feedback, Testinstrumente zur Erfassung der Feedbacknutzung. Bei allen Tests handelte es sich – mit Ausnahme der Testinstrumente zur Erfassung der Feedbacknutzung – um Paper-Pencil-Tests.

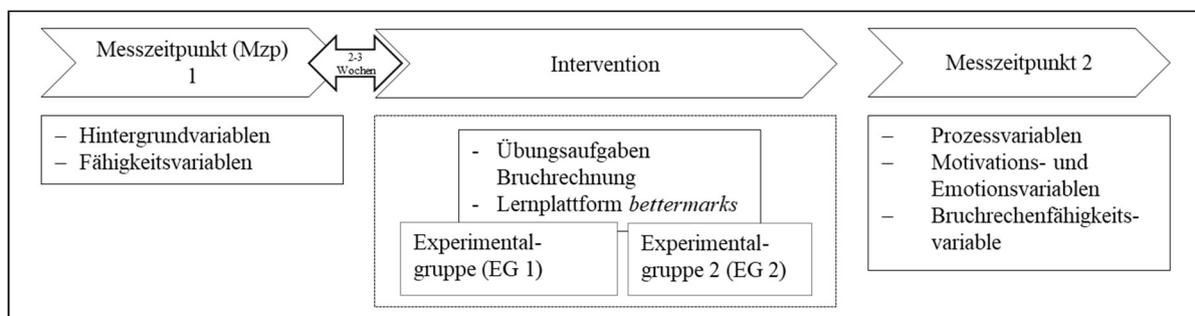


Abbildung 25: Übersicht der eingesetzten Testinstrumente in Verbindung zum Studiendesign

Tabelle 9: Übersicht der eingesetzten Testinstrumente

Mzp	Testinstrument	Skalen	Items	Zeit
1	Fragebogen zu allgemeinen Hintergrundvariablen	Demografische Daten		
		Geschlecht	1	Ohne Beschränkung
		Emotional-motivationale Variablen		Ohne Beschränkung
		Selbstwirksamkeitserwartung...	4	
		Motivation...	4	
		Interesse...	4	
		Selbstkonzept...	5	
		Angst...	5	
		...bezogen auf das Fach Mathematik		
		Variablen zu digitalen Medien		
		Einstellungen gegenüber digitalen Medien	3	Ohne Beschränkung
		Interesse an digitalen Medien	6	
		Selbstberichtete Kompetenz hinsichtlich digitaler Medien	5	
1	Kognitiver Fähigkeitstest		25	8 min
1	Lesetest		50	10 min
1 + 2	Bruchrechentest		37	45 min
2	Fragebogen zur Wahrnehmung des Feedbacks	Wahrgenommene/s Nützlichkeit	3	Ohne Beschränkung
		Kompetenzunterstützung	5	
		Kompetenzerleben	3	
		Konstruktive Unterstützung	4	
		Verstehensunterstützung	4	
2	Fragebogen zur Motivation und Emotionen	Intrinsische Motivation	3	Ohne Beschränkung
		Situatives Interesse	3	
		Belastung	3	
2	Bildschirmaufnahmen zur Erfassung der Feedbacknutzung und Polung des Feedbacks (positives vs. negatives Feedback; EG 2)			45 min

5.1 Testinstrument zur Erfassung allgemeiner Hintergrundvariablen

Wird in dieser Arbeit von „allgemeinen Hintergrundvariablen“ gesprochen, versteht man darunter Items zum Alter (offenes Antwortformat), Geschlecht (dreistufig mit 1 = weiblich, 2 = männlich, 3 = divers), dem eigenen Geburtsland und dem der Eltern (beides offene Antwortformate), den Sprachgebrauch zuhause (vierstufig mit „Ich spreche zuhause...deutsch“ 1 = immer, 2 = fast immer, 3 = manchmal, 4 = nie) sowie emotional-motivationale Variablen und

Variablen zu digitalen Medien (alle vierstufige Likert-Skalen mit 1 = stimme überhaupt nicht zu, 2 = stimme eher nicht zu, 3 = stimme eher zu, 4 = stimme völlig zu). Unbearbeitete Items (Missing Values), zwei oder mehr Kreuze sowie ein Kreuz in der Mitte zweier Antwortmöglichkeiten wurden mit 8 (= fehlend) kodiert.

Die Items bezüglich des Geburtslandes und des Sprachgebrauchs wurden in Anlehnung an das Skalenhandbuch der PISA-Studie aus 2012 (Mang et al., 2018) formuliert. Die Herkunft der emotional-motivationalen Skalen sowie der Skalen zu digitalen Medien werden in Tabelle 10 und Tabelle 11 inklusive Beispielitem präsentiert. Alle Items wurden in einem gemeinsamen Fragebogen erfasst, dessen Bearbeitung keiner zeitlichen Beschränkung unterlag, sodass allen Schüler*innen die Möglichkeit geboten wurde, alle Items zu beantworten.

Tabelle 10: Testinstrument zur Erfassung allgemeiner Hintergrundvariablen (emotional-motivationale Variablen)

Skalen zu emotional-motivationalen Variablen (Mathematik)	Items	Beispielitem	Quelle
Motivation bezogen auf das Fach Mathematik	MathMot 4	Ich lerne im Fach Mathematik, weil mir die Arbeit mit den Inhalten Spaß macht.	Leibniz-Institut für Bildungsverläufe e. V. (2020)
Selbstkonzept bezogen auf das Fach Mathematik	MathSk 5	In Mathematik lerne ich schnell	Mang et al. (2018)
Mathematikangst	MathAng 5	Ich mache mir oft Sorgen, dass es für mich im Mathematikunterricht schwierig wird.	Mang et al. (2018)
Selbstwirksamkeitserwartung bezogen auf Mathematik	MathSwe 4	In Mathematik bin ich sicher, dass ich auch den schwierigsten Stoff verstehen kann.	Ramm et al. (2006)
Interesse am Fach Mathematik	MathInt 4	Mich interessiert das, was ich in Mathematik lerne.	Mang et al. (2018)

Tabelle 11: Testinstrument zur Erfassung allgemeiner Hintergrundvariablen (Variablen hinsichtlich digitaler Medien)

Skalen zu digitalen Medien		Items	Beispielitem	Quelle
Einstellungen gegenüber digitalen Medien	DigMe-dEinst	3	Der Computer/das Notebook/das Smartphone/... ist sehr nützlich für Schul- und Hausaufgaben.	Mang et al. (2018) (adaptiert)
Selbstberichtete Medienkompetenz	DigMed-Komp	5	Wenn sich ein Problem mit einem digitalen Gerät ergibt, denke ich, dass ich es lösen kann.	Mang et al. (2021)
Interesse an digitalen Medien	DigMe-dInt	6	Ich vergesse schnell die Zeit, wenn ich digitale Geräte nutze.	Mang et al. (2021)

5.2 Testinstrument zur Erfassung der allgemeinen kognitiven Fähigkeiten

Zur Einschätzung der Fähigkeiten der Lernenden bearbeiteten diese zu Mzp 1 verschiedene Leistungstest. Aufgrund empirischer Befunde, die einen Zusammenhang zwischen kognitiven Fähigkeiten und mathematischer Leistung belegen (Ramseier & Brühwiler, 2003), wurde ein Testteil des standardisierten Testinstruments KFT 4-12+ (nonverbaler Teil N-Test 2 Form A) bestehend aus 25 Items für Klasse 7 eingesetzt (Heller & Perleth, 2000). Dieser fordert figurales Schlussfolgern und kann damit zur Erfassung fluider Intelligenz eingesetzt werden. Von den Lernenden wurde gefordert, zu einem vorgegebenen Figuren paar (z. B. ein kleines Dreieck ohne Füllfarbe und ein größeres Dreieck mit schwarzer Füllfarbe) ein zweites Figuren paar mit den gleichen Beziehungseigenschaften zu bilden. Dazu ist den Lernenden eine Figur vorgegeben (z. B. ein kleiner Halbkreis ohne Füllfarbe), der eine zweite aus einer Auswahl von fünf Figuren zuzuordnen ist (hier wäre die richtige Antwort ein größerer Halbkreis mit schwarzer Füllfarbe). Es handelte sich demnach um ein One-Choice-Format. Für die Bearbeitung der 25 Items hatten die Lernenden 9 Minuten Zeit.

Die 25 Testitems wurden dichotom mit 0 = falsch und 1 = richtig kodiert. Unbearbeitete Items wurden vorerst mit 8 (= fehlend) kodiert und im Hinblick auf nachfolgende Analysen auf 0 umkodiert. Sollten zwei oder mehr Kreuze oder ein Kreuz in die Mitte zweier Antwortmöglichkeiten gesetzt wurden sein, wurde die Aufgabe als falsch (= 0) kodiert. Die Kodierung wurde von der Autorin dieser Arbeit vorgenommen. Aufgrund der Eindeutigkeit richtiger bzw. falscher Antworten erschien eine Doppelkodierung von zwei unabhängigen Rater*innen als nicht notwendig, ohne dass das Gütekriterium der Objektivität verletzt wurde. Die entstandenen Rohwerte wurden gemäß der dem Test beiliegenden Anleitung in T-Werte transformiert. Diese T-

Werte können jahrgangs- oder schulformspezifisch (Haupt-, Realschule & Gymnasium) ermittelt werden. Da die Proband*innen der vorliegenden Stichprobe Gemeinschafts- bzw. Oberschulen entstammen, waren sie nicht einer der vorgegebenen Schulform zuordbar. Daher wurde sich für die Transformation in jahrgangsspezifische Werte entschieden.

5.3 Testinstrument zur Erfassung der Lesefähigkeiten

Aufgrund eines vermuteten Einflusses der Lesefähigkeiten der Lernenden auf die Feedbackwahrnehmung sowie der Feedbacknutzung wurde ein verkürzter C-Test als ein weiterer Test zur Erfassung von Fähigkeiten der Lernenden eingesetzt. Ein klassischer C-Test besteht meist aus mehreren (4-5) Texten (Grotjahn, 2002; Mashkovskaya, 2013). Aufgrund zeitlicher Einschränkungen und der Schwerpunktlegung auf andere Testteile wurde sich für die Durchführung eines verkürzten C-Tests, bestehend aus zwei Texten mit jeweils 25 Items, entschieden. So bestand der gesamte Test aus insgesamt 50 Items. Trotz der Kürzung war von einer validen Messung der Lesefähigkeiten der Siebtklässler*innen auszugehen. Textausschnitt Nummer eins mit dem Titel „Regierung beschließt Rauchverbot in Zügen und Ämtern“ sowie Ausschnitt zwei „Angst um Arbeitsplatz: Viele Hamburger gehen krank ins Büro“ entstammten Artikeln des Hamburger Abendblatts aus dem Jahr 2007. Durch die verschiedenen Thematiken der Texte sollten test bias vermieden werden (Zimmermann, 2019). Für beide Texte galt, dass für jedes zweite Wort die Hälfte des Worts – solange eine eindeutige Lösung verbleibt – nach dem Prinzip der reduzierten Redundanz getilgt wurde. Aufgabe der Lernenden war die korrekte Schließung der Lücken (Mashkovskaya, 2013; Zimmermann, 2019). Ein exemplarischer zu ergänzender Satz lautet: Ab 1. September ist Schluss mit Rauchen in allen Bahnhöfen, Zügen, Busen, Flugzeugen und Taxis. Der vollständige C-Test ist im Anhang 3 dargestellt. Zur Bearbeitung der 50 Items wurde den Lernenden ein Zeitlimit von 10 Minuten gesetzt.

Zwei unabhängige Rater*innen (Mathematik-Lehramtsstudierende des Masters) führten die Kodierung des verkürzten C-Tests des ersten Mzp durch. Der Test wurde mit 0 = falsch, 1 = Sinnhaftigkeit des Worts erkennbar, aber Fehler in Rechtschreibung oder Grammatik, 2 = richtig (maximal zu erreichende Punktzahl = 100 Punkte) kodiert. Unbearbeitete Aufgabenfelder wurden vorerst mit 8 = fehlend kodiert und im Hinblick auf nachfolgende Analysen auf 0 umkodiert. Zunächst wurden die Rater*innen in mehreren Sitzungen geschult. Ihnen stand die Musterlösung zur Verfügung. Anhand dieser Lösung wurden die Texte von 10 Schüler*innen gemeinsam kodiert, Schwierigkeiten besprochen und Ankerbeispiele insbesondere für den Code 1 identifiziert. Anschließend kodierten die Rater*innen 20 Testhefte selbstständig.

Cohens Kappa ergab eine Interraterreliabilität¹¹ von $\kappa = .59$, sodass die bereits kodierten C-Tests gemeinsam betrachtet und die unterschiedlichen Kodierungen diskutiert wurden. Die Musterlösung wurde um weitere Ankerbeispiele ergänzt. Die Rater*innen kodierten erneut 20 Testheft eigenständig, woraufhin die Übereinstimmung bei $\kappa = .87$ lag. Daraufhin begannen die Rater*innen jedes Testheft unabhängig voneinander doppelt zu kodieren. Die Interraterreliabilität ergab einen Wert von $\kappa = .94$ nach Kodierung aller Aufgaben. Unterschiedlich kodierte Aufgaben wurden im Rahmen eines gemeinsamen Diskurses konsensual angepasst. Die Ergebnisse der Kodierungen wurden mithilfe des Programms *Excel* dokumentiert und die Interraterreliabilität mit ebendiesem Programm berechnet.

5.4 Testinstrument zur Erfassung der Bruchrechenleistung

Zur Erfassung (1) der Bruchrechenleistung (Mzp 1) sowie (2) der Bruchrechenleistung anschließend an die Intervention (Mzp 2) wurde derselbe Bruchrechentest eingesetzt. Die Erfassung der Bruchrechenleistung (Mzp 1) erfolgte als Prätest vor der Intervention und wird im Laufe der Arbeit wiederkehrend als das Vorwissen zur Bruchrechnung bezeichnet. Das Testinstrument entwickelten und evaluierten Katja Lenz und Kolleginnen (z. B. Lenz et al. 2019). Ziel der Testerstellung und -evaluation war die Prüfung der Möglichkeit und Sinnhaftigkeit zur Trennung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung, was der Autor*innen-Gruppe gelang. Die Ergebnisse hinsichtlich des zweidimensionalen Modells (konzeptuell/prozedural) zeigten eine Überlegenheit gegenüber einem eindimensionalen Modell, wodurch die Trennbarkeit konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung gerechtfertigt wurde. Wie in Abschnitt B, Kapitel 1.2.2 dieser Arbeit diskutiert, ist die Förderung konzeptuellen (Wissen, warum) sowie prozeduralen Wissens (Wissen, wie) zur Bruchrechnung ein elementarer Baustein zum Lehren und Lernen von Bruchzahlen. Aufgrund der wichtigen Funktionen beider Wissensfacetten wurde der Test von Lenz et al. (2019) eingesetzt, um nicht nur zu überprüfen, ob eine digitale Lernplattform die Bruchrechnung im Allgemeinen, sondern auch das Verstehen (= konzeptuelles Wissen) neben der Automatisierung von Rechenregeln (= prozedurales Wissen) fördern kann.

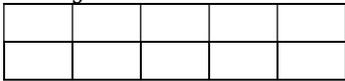
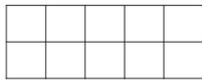
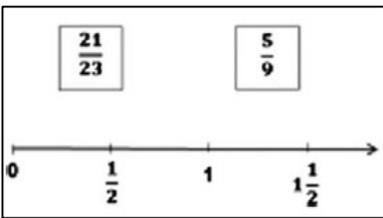
¹¹Die Interraterreliabilität gibt an, inwiefern zwei Personen (= Rater*innen) in ihren Ergebnissen hinsichtlich der Kodierung übereinstimmen. Für die Berechnung dieser Übereinstimmung eignet sich das Maß Cohens Kappa (κ). Cohens Kappa kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen, wobei hohe Kappa-Werte einer guten Interraterreliabilität entsprechen (Döring & Bortz, 2016). $\kappa > .60$ werden als akzeptabel angesehen (McHugh, 2012), während Werte $\geq .75$ als sehr gut gelten (Döring & Bortz, 2016).

Der Test besteht aus insgesamt 37 Items. Diese Items bilden verschiedene Dimensionen konzeptuellen sowie prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung ab. Zu der konzeptuellen Dimension gehören: die *Verbalisierung* von Konzepten zur Bruchrechnung, die Anwendung des Aspekts des Messens am *Zahlenstrahl* und die *Visualisierung* der GV „Teil eines Ganzen“ durch Übersetzung verschiedener Repräsentanten. Die Dimension „konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung“ besteht insgesamt aus 19 Testitems. Das prozedurale Wissen zur Bruchrechnung wiederum wird über 18 Items operationalisiert und umfasst folgende Inhalte: „*Verbalisierung* von Arbeitsschritten“, „*Umwandlung* unechter Brüche in gemischte Zahlen und andersherum“, „*Addition* und *Subtraktion* zweier Brüche oder eines Bruchs und einer ganzen Zahl“, „*Kürzen* und *Erweitern* eines Bruchs“.

In die Bruchrechenleistung umfassenden Analysen gehen (1) die Bruchrechenleistung, also das Gesamtergebnis, (2) das konzeptuelle Wissen zur Bruchrechnung sowie (3) das prozedurale Wissen zur Bruchrechnung ein. Hierbei gilt es transparent darzulegen, dass nicht alle Items des Bruchrechentests eine potenzielle Förderung durch die Intervention erfahren haben. Eine Veranschaulichung der Testitems liefert Tabelle 12. Für alle durch die Intervention potenziell geförderten Items (konz. g. und proz. g.) sind ergänzend Beispielaufgaben der Intervention dargestellt, um die Passung der Intervention zum Bruchrechentest zu verdeutlichen.

Für die Bearbeitung der insgesamt 37 Testitems waren 45 Minuten veranschlagt, sodass allen Schüler*innen die Möglichkeit gegeben wurde, die Aufgaben ohne zeitlichen Druck zu beenden.

Tabelle 12: Testinstrument zur Erfassung konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung nach Lenz et al. (2019), S. 11

	Items	Beispielitem Bruchrechentest	ggf. Beispielitem Intervention
Konz. g.	4	Male $\frac{3}{5}$ des Rechtecks an. 	Färbe $\frac{4}{10}$ des Rechtecks. 
Konz. n. g.	15	Rosa sagt: „ $\frac{3}{7}$ ist größer als $\frac{3}{5}$, weil 7 größer als 5 ist.“ Erkläre, warum sie nicht recht hat. Verbinde die Brüche in den Kästchen mit ihrem Platz auf dem Zahlenstrahl. 	
Proz. g.	12	Schreibe den unechten Bruch als gemischte Zahl. $\frac{14}{5} =$	Wandle den <u>unechten Bruch</u> in eine <u>gemischte Zahl</u> um. $\frac{23}{5} = \square$
		Berechne: $3 + \frac{1}{3} =$	Berechne $\frac{1}{6} + \frac{3}{4}$. Bilde zuerst den <u>Hauptnenner</u> und addiere anschließend die <u>Brüche</u> .
		Setze die richtige Zahl in das Kästchen ein! $\frac{12}{28} = \frac{\square}{7} =$	Vervollständige den <u>Bruch</u> . $\frac{72}{80} = \frac{\square}{10}$
Proz. n. g.	6	Schreibe eine Anleitung für das Addieren von ungleichnamigen Brüchen. Berechne: $\frac{5}{8} - \frac{1}{3} =$	

konz. g. = potenziell konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung geförderte und fördernde Aufgaben, konz. n. g. = potenziell konzeptuelles Wissens zur Bruchrechnung nicht geförderte Aufgaben, proz. g. = potenziell prozedurales Wissen zur Bruchrechnung geförderte und fördernde Aufgaben, proz n. g. = potenziell prozedurales Wissen zur Bruchrechnung nicht geförderte Aufgaben

Dieselben zwei unabhängigen Rater*innen (Mathematik-Lehramtsstudierende im Masterstudium), die ebenfalls den C-Test kodierten, führten die Kodierung der Bruchrechentests des ersten und zweiten Mzp durch. Der Test wurde vorerst dichotom mit 0 = falsch und 1 = richtig (maximal zu erreichende Punktzahl = 37 Punkte) kodiert. Leere Aufgabenfelder wurden mit 8 = fehlend kodiert. Diese Kodierung wurde im Verlauf allerdings zu 0 = falsch umkodiert, da

aufgrund ausreichender Bearbeitungszeit von fehlenden Fähigkeiten zur Bearbeitung auszugehen war. Zunächst wurden die Rater*innen in mehreren Sitzungen geschult. Ein Kodierleitfaden wurde zusammen mit dem Bruchrechentest von der Autor*innengruppe rund um Katja Lenz zur Verfügung gestellt. Anhand dieses Leitfadens wurden zehn Testhefte gemeinsam kodiert, Schwierigkeiten identifiziert und besprochen. Anschließend kodierten die Rater*innen 20 Testhefte selbstständig. Cohens Kappa ergab eine Interraterreliabilität von $\kappa = .67$, sodass die Aufgaben der Testhefte erneut gemeinsam betrachtet wurden und der Kodierleitfaden konkretisiert und um weitere Ankerbeispiele ergänzt wurde. Die Rater*innen kodierten weitere 20 Testhefte eigenständig, woraufhin die Übereinstimmung bei $\kappa = .89$ lag. Daraufhin begannen die Rater*innen jedes Testheft doppelt zu kodieren. Aus den beiden Testkodierungen ergaben sich „kritische“ Aufgaben, sodass diese Aufgaben hintereinander zu kodieren waren, um eine möglichst einheitliche Kodierung über die Testhefte hinweg zu schaffen. Die Interraterreliabilität ergab einen Wert von $\kappa = .94$ nach Kodierung aller Aufgaben. Unterschiedlich kodierte Aufgaben wurden gemeinsam betrachtet, diskutiert und sich konsensuell geeinigt. Die Ergebnisse der Kodierung wurden mit Hilfe des Programms *Excel* dokumentiert und die Interraterreliabilität mit ebendiesem Programm berechnet.

5.5 Testinstrument zur Erfassung der Motivation und Emotionen

Neben dem Wissen zur Bruchrechnung wurde anschließend an die Intervention die Motivation und Emotionen als weitere abhängige Variablen über einen Fragebogen erfasst. Dadurch sollte nicht nur gemessen werden, wie sich das Üben mit digitalen Lernplattformen auf die Bruchrechenleistung der Schüler*innen auswirkt, sondern auch auf motivationale und emotionale Variablen, die wiederum in einem vermuteten Zusammenhang mit der Leistung der Lernenden stehen (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.5). Anhand von drei Subskalen zu Motivation und Emotionen (alle vierstufige Likert-Skalen mit 1 = stimme überhaupt nicht zu, 2 = stimme eher nicht zu, 3 = stimme eher zu, 4 = stimme völlig zu) wurde entsprechend erfasst, ob die Lernenden beim Arbeiten mit der Lernplattform intrinsisch motiviert waren, situatives Interesse verspürten sowie sich belastet fühlten (vgl. Tabelle 13). Unbearbeitete Items (Missing Values), zwei oder mehr Kreuze sowie ein Kreuz in der Mitte zweier Antwortmöglichkeiten wurden mit 8 (= fehlend) kodiert. Zur Beantwortung der Testitems wurde den Lernenden kein Zeitlimit gesetzt.

Tabelle 13: Testinstrument zur Erfassung der Motivation und Emotionen

Subskala zur Motivation und Emotionen	Items	Beispielitem	Quelle (alle Skalen adaptiert)
Intrinsische Motivation	IntrMot 3	Beim Üben mit der Lernplattform macht das Lernen richtig Spaß.	Reinhold et al. (2021)
Situatives Interesse	SitInt 3	Beim Üben mit der Lernplattform bin ich neugierig.	Reinhold et al. (2021)
Belastung	Bel 3	Beim Üben mit der Lernplattform geht mir alles zu schnell.	Reinhold et al. (2021)

5.6 Testinstrument zur Erfassung der Wahrnehmung von Feedback

Die Wahrnehmung des Feedbacks als Prozessvariable wurde unmittelbar im Anschluss an die Intervention über fünf Subskalen (alle vierstufige Likert-Skalen mit 1 = stimme überhaupt nicht zu, 2 = stimme eher nicht zu, 3 = stimme eher zu, 4 = stimme völlig zu) erfasst: „wahrgenommene Nützlichkeit“, „wahrgenommene Kompetenzunterstützung“, „wahrgenommenes Kompetenzerleben“, „wahrgenommene konstruktive Unterstützung“, „wahrgenommene Versteherunterstützung“ (vgl. Tabelle 14). Drei der Subskalen indizieren ihre Items mit dem Stamm „Durch die Rückmeldungen und Hilfen...“, wodurch den Schüler*innen beim ersten Lesen der Bezug zum Feedback verdeutlicht wird. Die Items der beiden weiteren Subskalen besitzen den Stamm „Die Lernplattform...“, wobei inhaltlich für jedes Item der Bezug zum Feedback hergestellt wird. Unbearbeitete Items (Missing Values), zwei oder mehr Kreuze sowie ein Kreuz in der Mitte zweier Antwortmöglichkeiten wurden mit 8 (= fehlend) kodiert. Zur Beantwortung der Items wurde den Lernenden kein zeitliches Limit gesetzt.

Tabelle 14: Testinstrument zur Erfassung der Feedbackwahrnehmung

Skalen zur Wahrnehmung des Feedbacks	Items	Items	Beispielitem	Quelle (alle Skalen adaptiert)
Wahrgenommene Nützlichkeit	WNützlich	3	Durch die Rückmeldungen und Hilfen wurde mir gezeigt, wo ich mich noch verbessern kann.	Bürgermeister et al. (2011)
Wahrgenommene Kompetenzunterstützung	WKompUnt	5	Durch die Rückmeldungen und Hilfen habe ich das Gefühl, dass ich mein Wissen bei der nächsten Aufgabe umsetzen kann.	Bürgermeister et al. (2011)
Wahrgenommenes Kompetenzerleben	WKompErl	3	Durch die Rückmeldungen und Hilfen habe ich mich persönlich gefördert gefühlt.	Ramm et al. (2006)
Wahrgenommene konstruktive Unterstützung	WKonstUnt	4	Die Lernplattform erklärt besonders an schwierigen Stellen ganz sorgfältig.	Baumert et al. (2008)
Wahrgenommene Verstehensunterstützung	WVerstUnt	4	Die Lernplattform bietet die Möglichkeit zu verstehen, warum ein mathematisches Verfahren funktioniert.	Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) (o. D.)

5.7 Testinstrument zur Erfassung der Feedbacknutzung sowie Feedbackpolung (positives vs. negatives Feedback)

Der Definition von Ramaprasad (1983) folgend (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.1) gilt eine Information beispielsweise einer Lernplattform an Lernende erst als Feedback, wenn diese Information nicht nur die Intention verfolgt, eine Wissenslücke zu schließen, sondern wenn die Information auch tatsächlich durch die empfangende Person genutzt wird. Die bewusste Nutzung von Feedback spielt daher allein aus definitorischer Perspektive eine entscheidende Rolle. Vor allem aber ist bekannt, dass Feedback erst wirken kann, wenn Lernende dieses als solches erkennen und nutzen (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.4). Aufgrund der Feedbacknutzung als scheinbar elementare Einflussvariable hinsichtlich der Wirksamkeit von Feedback wurde in dieser Studie das Feedbacknutzungsverhalten beider Gruppen erfasst. Ziele dabei sind (1) die Untersuchung, ob das Feedback überhaupt Verwendung findet, (2) die Charakterisierung von Lernenden bezüglich ihres Nutzungsverhaltens und (3) die Feststellung, wer von der Feedbacknutzung (nicht) profitiert. Die Erfassung der Feedbacknutzung erwies sich allerdings als nicht ganz unkompliziert. Vorangegangene Versuche zur Operationalisierung der Feedbacknutzung wurden bereits in Abschnitt B, Kapitel 3.4 dieser Arbeit diskutiert. Die Feedbacknutzung wurde

wie nachfolgend dargestellt in dieser Arbeit hinsichtlich der beiden EG unterschiedlich operationalisiert und erfasst.

Operationalisierung EG 1 „KR“:

Den Lernenden der EG 1 wurde nach einem ersten Bearbeiten aller Aufgaben das Feedback hinsichtlich der Korrektheit ihrer Antworten gegeben (KR). Anschließend wurde den einzelnen Lernenden durch die Testleitung freigestellt, die falsch bearbeiteten Aufgaben zu wiederholen, ihre Ergebnisse aus dem ersten Durchgang notierten die Lernenden dabei auf einem Zettel. So konnten diese überprüfen, ob bzw. inwiefern sie bei einem zweiten Durchgang ihr Ergebnis korrigieren können. Die Testhefte derjenigen Schüler*innen, die den Wunsch eines zweiten Versuchs äußerten, wurden markiert, damit die Lernenden, die durch das Feedback zu einem weiteren Versuch angeregt wurden, von denjenigen abgegrenzt werden konnten, die ihre Aufgaben nicht überarbeiten wollten.

Operationalisierung EG 2 „elabo“:

Die Nutzung des Feedbacks der EG 2 wurde über die gesamte Intervention hinweg beobachtet. Dies geschah über Bildschirmaufnahmen. Durch diese Aufnahmen konnte in der Auswertungsphase der Umgang mit dem Feedback der Lernplattform analysiert werden. Die Feedbacknutzung der EG 2 bezieht sich auf die angebotenen Hilfen (Definitionen, Tipp zeigen, Nachschlagen, Lösung zeigen) (vgl. Kapitel 4.2.2). Hinsichtlich der Hilfen wird (1) die Häufigkeit des Aufrufes von den jeweiligen Hilfen als auch (2) die Dauer, die auf den Hilfen verbracht wurde, kodiert. Insgesamt wird die Feedbacknutzung dadurch über acht Feedbacknutzungsindikatoren operationalisiert: (1) Dauer „Definitionen“, (2) Dauer „Tipp zeigen“, (3) Dauer „Nachschlagen“, (4) Dauer „Lösung zeigen“, (5) Häufigkeit „Definitionen“, (6) Häufigkeit „Tipp zeigen“, (7) Häufigkeit „Nachschlagen“, (8) Häufigkeit „Lösung zeigen“.

Feedbackpolung EG 2 „elabo“:

Im Zuge der Bildschirmaufnahmen wurde für EG 2 auch erfasst, ob das Feedback positiv oder negativ ausfiel, was in dieser Arbeit als „Polung des Feedbacks“, bzw. „positives vs. negatives Feedback“ bezeichnet werden soll. Positives Feedback erhielten die Lernenden in Form der Feedbackart KR („Das ist richtig“) sowie einer Figur mit einem lobenden Spruch (z. B. „Das hast du toll gemacht“). Negatives Feedback wurde für den ersten Lösungsversuch ebenfalls in Form von KR präsentiert („Das ist leider nicht richtig“), bei einem zweiten Fehlversuch erhielten die Lernenden über KR hinaus die korrekte Lösung (KCR) mit zusätzlichem beispielhaftem

Lösungsweg. Operationalisiert wird die Feedbackpolung über die Häufigkeit, die positives und negatives Feedback präsentiert wurde.

5.8 Item- und Skalenanalysen der eingesetzten Testinstrumente

Als Vorbereitung auf die Analysen werden vorab Item- und Skalenanalysen vorgenommen. Zur Durchführung der Analysen ist die Bildung eines Gesamtscores aus einzelnen Items notwendig. Als Voraussetzung eines solchen Gesamtscores gilt, wie nachfolgend dargestellt, die ausreichende interne Konsistenz einer Skala. In diesem Zusammenhang ist auch die Trennschärfe der Items einer Skala zu berücksichtigen. Für Items bezogen auf Leistungstests gilt es darüber hinaus Itemschwierigkeiten zu betrachten.

Interne Konsistenz

Die Messung der internen Konsistenz ist eine Methode der Reliabilitätsschätzung. Die Reliabilität wird innerhalb der Klassischen Testtheorie als eines von drei Gütekriterien wissenschaftlichen Arbeitens benannt und wird dabei als „Anteil der Varianz der wahren Werte an der Varianz der beobachteten Werte“ definiert (Krumm et al., 2021, S. 138). Die interne Konsistenz bezieht sich auf die Homogenität von Items einer Skala und gibt an, welcher Teil der Varianz durch tatsächliche Unterschiede im gemessenen Merkmal und nicht durch Messfehler erklärt werden kann (Kelava & Moosbrugger, 2012). In der klassischen Testtheorie wird häufig Gebrauch von Cronbachs Alpha-Koeffizienten α^{12} als Maß für die interne Konsistenz gemacht (Döring & Bortz, 2016; Heimsch et al. 2018). Cronbachs Alpha kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, dabei weist ein höherer Wert lediglich auf eine höhere Interkorrelation zwischen den Items hin, über die Qualität eines Tests kann jedoch nicht zwangsläufig eine Aussage getroffen werden. So sollen manche Tests beispielsweise eine große Bandbreite abfragen, wodurch eine niedrige Interkorrelation der Items als wünschenswert erscheint (Krumm, Schmidt-Atzert & Amelang, 2021). Dennoch wird für Testitems, die dasselbe Konstrukt messen, von Döring und Bortz (2016) ein Richtwert von $\alpha \geq .80$ benannt. An diesem Richtwert orientiert sich auch die vorliegende Arbeit, jedoch werden die Items einer Skala mit einem niedrigen Cronbachs Alpha zusätzlich inhaltlich betrachtet sowie unter Einbezug der Trennschärfe beurteilt, ob die Bildung einer Skala möglich ist.

¹² Es soll hier nicht unerwähnt bleiben, dass die Verwendung von Cronbachs Alpha unter Wissenschaftler*innen kritisch diskutiert wird (Döring & Bortz, 2016; Gäde et al., 2020; Krumm, Schmidt-Atzert & Amelang, 2021). Da es sich in der vorliegenden Arbeit um bereits etablierte und erprobte Skalen handelt, wurde sich dennoch für Cronbachs Alpha als Maß der Reliabilitätsprüfung entschieden.

Trennschärfe

Die Trennschärfe r_{it} bezieht sich auf die Fähigkeit von Items einer Skala zwischen Personen oder Objekten mit unterschiedlichen Merkmalen oder Eigenschaften zu unterscheiden. Sie gibt demnach an, wie gut ein Test in der Lage ist, wahre Unterschiede zwischen Proband*innen zu erkennen. Eine hohe Trennschärfe bedeutet also, dass das Item Proband*innen mit unterschiedlichen Merkmalen voneinander zu unterscheiden vermag. Ein Test mit hoher Trennschärfe kann zuverlässig zwischen Personen mit hoher und niedriger Ausprägung eines bestimmten Merkmals unterscheiden. Ermittelt wird die Trennschärfe über Korrelationen zwischen dem Item und dem Gesamtwert (ohne das jeweilige Item) und kann einen Wert zwischen $-1 \leq r_{it} \leq +1$ annehmen (Heimsch et al., 2018; Döring & Bortz, 2016). Laut Kelava und Moosbrugger (2012) liegen gute Trennschärfen im Bereich von .40 bis .70 vor. Andere Quellen definieren Werte zwischen .30 und .50 als mittelmäßige und Werte größer als .50 als hohe Trennschärfe (Döring & Bortz, 2016; Fisseni, 2004). Der Ausschluss eines Items mit geringer Trennschärfe wird jedoch nicht zwangsläufig empfohlen, stattdessen sollten inhaltliche Aspekte Berücksichtigung finden. Für Items einer Skala mit inhaltlicher Breite geht meist eine geringere Trennschärfe einher (Döring & Bortz, 2016). Unter Betrachtung inhaltlicher Aspekte und aufgrund des Fakts, dass es sich in der vorliegenden Arbeit um bereits erprobte Skalen handelt, wurden niedrig trennscharfe Items für nachfolgende Analysen nicht entfernt, so lange trotz einer Beibehaltung eine akzeptable interne Konsistenz gewährleistet ist.

Schwierigkeitsindex

Bezüglich dichotom kodierter „Richtig-Falsch-Aufgaben“, wie diese beispielsweise in dem eingesetzten Bruchrechentest vorkommen, kann die Itemschwierigkeit hinsichtlich des Schwierigkeitsindex P_i beurteilt werden. Der Schwierigkeitsindex lässt sich über den prozentualen Anteil der korrekten Antworten bestimmen. Besonders schwierige Items sowie sehr leichte Items liefern kaum Informationen über Personeneigenschaften und sind daher nicht wünschenswert, dennoch sollte zum Zweck einer ausreichenden Differenzierung der Leistung der Proband*innen auf eine möglichst breite Spannweite der Itemschwierigkeit geachtet werden (Döring & Bortz, 2016). Der Schwierigkeitsindex sollte Heimsch et al. (2018) sowie Döring und Bortz (2016) folgend zwischen $20 \% < P_i < 80 \%$ liegen. Kelava und Moosbrugger (2012) sprechen eine Empfehlung in einem Bereich von $5 \% < P_i < 95 \%$ aus. Besonders wichtig ist jedoch die Berücksichtigung der Trennschärfe sowie die Betrachtung der Stichprobe. Da ausschließlich Siebtklässler*innen von Gemeinschaftsschulen an der Studie teilnahmen, die von Distanzun-

terriert aufgrund der zeitweisen pandemischen Lage betroffen waren, ist von einer eher leistungsschwachen Stichprobe auszugehen. Um ein möglichst großes Leistungsspektrum abzubilden, wurden weder sehr leichte noch sehr schwere Items entfernt.

5.8.1 Analysen der eingesetzten Items und Skalen

Tabelle 15 bietet eine Übersicht zu den Reliabilitätswerten (Cronbachs Alpha), den Trennschärfen sowie bezüglich der Leistungstests zu den Itemschwierigkeiten. In Anhang 4 sind Werte zu den einzelnen Items der Skalen zu finden. Für die Bruchrechenleistung, die kognitiven Fähigkeiten, den Lesefähigkeiten, die Subskalen der Motivation und Emotionen als auch der Feedbackwahrnehmung lässt sich eine ausreichende Reliabilität festhalten. Auch die Trennschärfen lassen sich den Konventionen von Kelava und Moosbrugger (2012) folgend in einem guten Bereich einordnen. Auch für die motivational-emotionalen Variablen ergeben sich gute Werte für Cronbachs Alpha und die Trennschärfen.

Ausnahme bilden die Variablen zu digitalen Medien. Die Item- und Skalenanalysen ergeben durchaus kritische Werte. Dennoch sollen die Skalen nicht ausgeschlossen werden, da von einem Einfluss der Variablen zu digitalen Medien auf die Wahrnehmung digital-gestützten Feedbacks ausgegangen werden kann – allerdings sollten die geringen Werte der Item- und Skalenanalysen stets kritisch mitgedacht werden.

Tabelle 15: Cronbachs Alpha, Trennschärfe sowie ggf. Itemschwierigkeiten der eingesetzten Skalen

	Items	n	α	Trennschärfe	Itemschwierigkeit
Bruchrechenleistung (Mzp 1)					
LeistGes1	37	137	.94	.94	.04 < P _i < .92
LeistKonz1	19	137	.86	.84 < r _{it} < .86	.04 < P _i < .92
LeistProz1	18	137	.93	.92 < r _{it} < .93	.13 < P _i < .56
Bruchrechenleistung (Mzp 2)					
LeistGes2	37	137	.92	.93 < r _{it} < .94	.04 < P _i < .92
LeistKonz2	19	137	.85	.83 < r _{it} < .85	.04 < P _i < .92
LeistProz2	18	137	.92	.91	.13 < P _i < .64
KognFäh	25	137	.91	.91	.26 < P _i < .74
LeseFäh	50	137	.95	.95	.00 < P _i < .90 (Code 2) .01 < P _i < .50 (Code 1) .10 < P _i < .97 (Code 2 + 1)
Motivation und Emotionen					
IntrMot	3	137	.80	.64 < r _{it} < .82	
SitInt	3	137	.77	.58 < r _{it} < .81	
Bel	3	137	.73	.46 < r _{it} < .76	
Feedbackwahrnehmung					
WKompUnt	5	137	.79	.72 < r _{it} < .77	
WKompErl	3	137	.70	.53 < r _{it} < .71	
WNützlich	3	137	.70	.58 < r _{it} < .64	
WVerstehUnt	4	137	.74	.65 < r _{it} < .75	
WKonstUnt	4	137	.80	.73 < r _{it} < .75	
Variablen bezogen auf digitale Medien					
DigMedEinst	3	137	.65	.41 < r _{it} < .65	
DigMed-Komp	6	137	.59	.47 < r _{it} < .57	
DigMedInt	5	137	.63	.52 < r _{it} < .64	
Motivational-emotionale Variablen (Mathematik)					
MathMot	4	137	.85	.80 < r _{it} < .83	
MathSk	5	137	.86	.79 < r _{it} < .86	
MathAng	5	137	.75	.68 < r _{it} < .74	
MathSwe	4	137	.83	.73 < r _{it} < .82	
MathInt	4	137	.85	.78 < r _{it} < .88	

LeistGes1 = Bruchrechenleistung (Mzp 1), LeistKonz1 = Konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung (Mzp 1), LeistProz1 = Prozedurales Wissen zur Bruchrechnung (Mzp 1), LeistGes2 = Bruchrechenleistung (Mzp 2), LeistKonz2 = Konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung (Mzp 2), LeistProz2 = Prozedurales Wissen zur Bruchrechnung (Mzp 2), KognFäh = allgemeine kognitive Fähigkeiten, LeseFäh = Lesefähigkeiten, IntrMot = Intrinsische Motivation, SitIntr = Situatives Interesse, Bel = Belastung, WKompUnt = wahrgenommene Kompetenzunterstützung, WKompErl = wahrgenommenes Kompetenzerleben, WNützlich = wahrgenommene Nützlichkeit, WVerstUnt = wahrgenommene Verstehensunterstützung, WKonstUnt = wahrgenommene konstruktive Unterstützung, DigMedEinst = Einstellungen gegenüber digitalen Medien, DigMedKomp = Selbstberichtete Kompetenzen bezogen auf digitale Medien, DigMedInt = Interesse an digitalen Medien, MathMot = Motivation bezogen aufs Fach Mathematik, MathSk = Selbstkonzept bezogen aufs Fach Mathematik, MathAng = Mathematikangst, MathSwe = Selbstwirksamkeitserwartung bezogen aufs Fach Mathematik, MathInt = Interesse am Fach Mathematik

6 Umgang mit fehlenden Werten

Fehlende Werte (auch Missing Values genannt) lassen sich in „Unit-Nonresponses“ und „Item-Nonresponses“ unterteilen. Unit-Nonresponses schließen die fehlende Beantwortung ganzer Abschnitte oder Instrumente ein. Item-Nonresponses wiederum beziehen sich, wie der Name bereits erkennen lässt, auf einzelne unbeantwortete Items (Wahl, 2020). Hinsichtlich der vorliegenden Arbeiten wurden vorerst die Proband*innen von den Analysen ausgeschlossen, die nur an einem Mzp teilnahmen (Unit-Nonresponse). Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um 32 Schüler*innen¹³, die nur zu einem der beiden Mzp anwesend waren. Diese hohe Drop-out Quote lässt sich mit der zum Zeitpunkt der Erhebung vorherrschenden pandemischen Lage erklären, aufgrund derer eine hohe Krankheits- und damit einhergehend Abwesenheitsquote in den Schulen vorherrschte.

Hinsichtlich der Item-Nonresponse, also einzelner fehlender Werte, soll innerhalb dieser Studie zwischen den Items der Leistungstests und den aus den beiden Fragebögen hervorgehenden Variablen unterschieden werden. Nicht bearbeitete Items der Leistungstests wurden als 0, also als inkorrekt gewertet, da davon auszugehen war, dass es den Lernenden nicht möglich war, die Aufgaben korrekt zu bearbeiten. Bezüglich der Leistungstests entstanden diesem Vorgehen entsprechend keine fehlenden Werte. Für die Fragebogenitems liegen allerdings einzelne fehlende Werte vor. Wissenschaftlich gängig werden solche fehlenden Werte unter bestimmten Voraussetzungen durch verschiedene Verfahren geschätzt (Bergmann & Franzese, 2020; Reisinger et al., 2012).

Vorab wurden die fehlenden Werte pro Fall analysiert, um ggf. Proband*innen mit hohen Missing Quoten für spätere Analysen auszuschließen (Reisinger et al, 2012). Die Analyse der Daten zeigt für 80 (58,4 %) der Proband*innen ($N = 137$) einen vollständigen Datensatz. Die höchste Anzahl an fehlenden Werten beträgt für eine Schülerin 16 Werte (vgl. Anhang 5, Tabelle 47). Aufgrund des bereits bereinigten Datensatzes und weil während der Erhebung Maßnahmen zur Vermeidung fehlender Daten umgesetzt wurden, wurden keine Schüler*innen aufgrund einer zu hohen Menge an fehlenden Werten ausgeschlossen. Dennoch lagen einzelne fehlende Werte vor, die ein Problem für die spätere Auswertung darstellen (könnten).

Hinsichtlich des Umgangs mit diesen fehlenden Werten liegen verschiedene Strategien vor, aus denen es für den vorliegenden Datensatz eine passende auszuwählen galt. Zwei Möglichkeiten stellen die Analyse mit einem vollständigen Datensatz – Analysen werden also nur mit den

¹³ Zur Erinnerung: Die nachfolgenden Analysen beziehen sich nach Ausschluss der 32 Schüler*innen auf $n = 137$ Schüler*innen.

Lernenden vorgenommen, für die alle Daten vorliegen – oder das „Ignorieren“ fehlender Werte, z. B. durch einen listenweisen Fallausschluss, dar. Beide Methode finden zwar immer noch häufig Anwendung, durch den Verlust an Informationen stoßen sie jedoch vermehrt auf Kritik (Bergmann & Franzese, 2020; Reisinger et al., 2012). Eine andere Variante bietet die Möglichkeit, fehlende Werte durch sogenannte Imputationsverfahren zu schätzen, sodass anschließend ein vollständiger Datensatz vorliegt (Bergmann & Franzese, 2020; Reisinger et al., 2012; Urban et al., 2016). Schendera (2007) gibt Richtwerte vor, wann eine Imputation sinnvoll sein kann. Bei unter 1 % fehlender Werte können diese ignoriert werden, ab 1 % fehlender Werte sollte allerdings eine Imputation stattfinden. Um herauszufinden, ob eine Imputation für den vorliegenden Datensatz notwendig ist, wird die Missingquote pro Item ermittelt. Für die vorliegenden Daten liegt eine Quote zwischen 0 % und 5.8 % vor (vgl. Anhang 5, Tabelle 48). Eine Imputation erscheint demnach als durchaus sinnvoll.

Die Multiple Imputation wurde in den vergangenen Jahren als eine der passendsten Lösungen hinsichtlich des Umgangs mit fehlenden Werten diskutiert (Peugh & Enders, 2004). Allerdings ist die Methodik verhältnismäßig neuartig, weshalb manche Autor*innen dieser Imputation eine gewisse Fehleranfälligkeit unterstellen (Urban et al., 2016). Um einen Datenverlust zu vermeiden – welcher beispielsweise unter Verwendung des listenweisen Fallausschlusses generiert würde – wird sich für diese Arbeit für die Multiple Imputation entschieden.

Bezüglich der Multiplen Imputation muss auf besondere Voraussetzungen getestet werden, bevor diese durchgeführt werden kann. Wichtig ist insbesondere die Untersuchung des Datensatzes hinsichtlich des Missing-Mechanismus. Es wird zwischen folgenden Mechanismen unterschieden: Missing Completely at Random (MCAR), Missing at Random (MAR) und Missing not at Random (MNAR) (Böwing-Schmalenbrock & Jurczok, 2011). Die Multiple Imputation kann bei einem vorliegenden MCAR-Mechanismus durchgeführt werden, ein MAR-Mechanismus wäre allerdings wünschenswerter (Urban et al., 2016). Außerdem sollte eine Normalverteilung der Daten bei den zu imputierenden Items vorliegen (Enderle, 2015; Reisinger et al., 2012). Liegt keine Normalverteilung vor, können die Daten vor dem Imputationsverfahren transformiert werden¹⁴. Die Daten wurden auf die benötigten Voraussetzungen geprüft. Hinsichtlich der fehlenden Werte ist die Voraussetzung des MCAR-Mechanismus erfüllt. Dies

¹⁴ Liegt ein linkssteiles Item vor wird das Logarithmieren diesen Items empfohlen, für rechtssteile Items die quadratische Transformation (Reisinger et al., 2012). So entstehen neue, transformierte Items, die nach erfolgreicher Imputation wieder zurücktransformiert werden (Böwing-Schmalenbrock & Jurczok, 2011).

wurde mit Hilfe des sogenannten Little's Test¹⁵ geprüft ($\chi^2 = 3623.02$, $p = .35$). Die Items wurden unter Bezugnahme von (1) Schiefe und Kortosis, (2) dem Kolmogoroff-Smirnov-Test sowie (3) Diagrammen (optisch) auf Normalverteilung geprüft (Yap & Sim, 2011) (vgl. Anhang 6). Bei Bedarf wurden nicht normalverteilte Items transformiert, sodass die Durchführung der Multiple Imputation möglich war. Die Datenimputation wurde mit *R* (Version 4.2.2) und dem Paket *mice* durchgeführt.

7 Forschungsfragen, Hypothesen und Wirkmodelle

Bereits in Kapitel 1 wurden die zu untersuchenden Forschungsfragen sowie ein Wirkmodell mit zentralen Variablen ausgehend von den theoretischen Vorüberlegungen vorgestellt. Nach Darstellung nicht nur theoretischer Überlegungen und empirischer Erkenntnisse (Abschnitt B), sondern auch dem Design der Intervention (Kapitel 2) und den eingesetzten Instrumenten inklusive erhobenen Variablen (Kapitel 5), werden an dieser Stelle die Forschungsfragen um Hypothesen sowie weitere Wirkmodelle ergänzt. Nachfolgendes Kapitel gibt demnach in Vorbereitung auf die empirischen Analysen einen Überblick hinsichtlich aller zu beantwortenden Forschungsfragen sowie zu untersuchenden Hypothesen und Modelle.

Forschungsfrage 1: (Inwiefern) Unterscheiden sich die beiden Feedbackbedingungen hinsichtlich der Bruchrechenleistung (Mzp 2), der Motivation und Emotionen sowie der Feedbackwahrnehmung?

Hypothese 1: Die Lernenden der EG 1 „KR“ zeigen im Mittel signifikant schlechtere Bruchrechenleistung (Mzp 2) als die Lernenden der EG 2 „elabo“.

Hypothese 1.1: Die Lernenden der EG 1 „KR“ verbessern sich im Mittel von Mzp 1 zu Mzp 2 signifikant weniger hinsichtlich ihrer Bruchrechenleistung im Vergleich zu den Lernenden der EG 2 „elabo“.

Hypothese 1.2: Die Lernenden der EG 1 „KR“ und der EG 2 „elabo“ verfügen im Mittel über differenzierende Motivation und Emotionen.

Hypothese 1.3: Die Lernenden der EG 1 „KR“ nehmen das Feedback im Mittel signifikant schlechter wahr als die Lernenden der EG 2 „elabo“.

¹⁵ Der Little's Test vergleicht die Itemmittelwerte der Gruppe mit fehlenden Werten mit den Itemmittelwerten der Gruppe mit vollständigem Datensatz. Die Nullhypothese lautet, dass die MCAR-Eigenschaft als erfüllt angenommen werden kann. Ein nicht-signifikantes Ergebnis bestätigt damit die MCAR-Eigenschaft (Urban et al., 2016).

Forschungsfrage 1 widmet sich dem Einfluss der Feedbackbedingungen (verzögertes KR Feedback vs. direktes elaboriertes Feedback) auf die Bruchrechenleistung von Siebtklässler*innen, der Motivation und Emotionen sowie der Feedbackwahrnehmung (vgl. Abbildung 26).

Die Bruchrechnung stellt ein komplexes Themenfeld mit einigen Schwierigkeiten für Lehrende sowie Lernende dar. Verschiedene Ansätze gehen von einer Notwendigkeit der Förderung sowohl konzeptuellen als auch prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung aus. Ein Ziel dieser Arbeit ist daher die Überprüfung, ob durch das Arbeiten mit digitalen Lernplattformen im Allgemeinen und dem digital-gestützten Feedback im Speziellen beide Wissensfacetten gefördert werden können. Wie die theoretischen Ausführungen in Abschnitt B, Kapitel 3 zwar ausführlich darstellen, zeichnen die Ergebnisse zur Wirksamkeit von Feedback in empirischen Studien kein einheitliches Bild, dennoch ist von einer Überlegenheit direkten elaborierten Feedbacks gegenüber weniger komplexen und verzögertem Feedbackarten (wie dem KR) hinsichtlich der Bruchrechenleistung insbesondere für leistungsschwächere Lernende auszugehen (Hypothese 1).

Die Förderung von Motivation und positiven Emotionen stellt ein weiteres Ziel schulischer Lehr-Lern-Prozesse dar. Daher beschäftigt sich die Forschungsfrage mit der Ausprägung von Motivation sowie Emotionen der Lernenden, nachdem diese einfaches (KR) Feedback bzw. elaboriertes Feedback erhalten haben. Bezüglich des Einflusses der Feedbackart auf Motivation und Emotionen lässt sich ausgehend von den in Abschnitt B aufgearbeiteten Erkenntnissen keine gerichtete Hypothese formulieren (Hypothese 1.1). Feedback stellt sich als facettenreiches Konstrukt mit vielen Einflussvariablen dar. Empirische Erkenntnisse zum Einfluss auf Motivation und Emotionen zeigen sich als nicht eindeutig und bedürfen weiterer ergänzender Forschung.

Bezüglich der Feedbackwahrnehmung zeigen neuere Forschungsergebnisse, dass Lernende elaboriertes Feedback als positiver wahrnehmen. Aus dieser Erkenntnis resultiert auch die gerichtete Hypothese 1.2. Allerdings soll einschränkend auch auf die geringe Menge bisheriger Forschungsergebnisse hingewiesen werden.

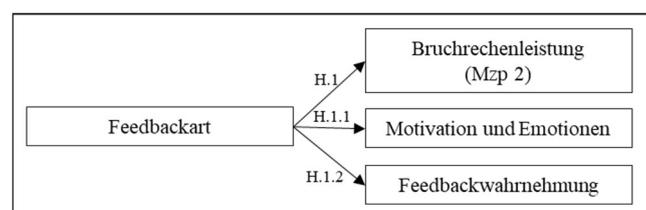


Abbildung 26: Modell zum Einfluss zwei verschiedener Feedbackarten auf die Bruchrechenleistung (Mzp 2), die Motivation und Emotionen sowie die Feedbackwahrnehmung

Forschungsfrage 1.1: Inwiefern nutzen die Lernenden das angebotene Feedback der Lernplattform?

Die Feedbacknutzung wurde für die beiden Feedbackbedingungen unterschiedlich operationalisiert. Daher erscheint ein Vergleich der beiden EG als nicht passend, weshalb Forschungsfrage 1.1 auf rein deskriptiver Ebene beantwortet wird. Da die Forschungslage zur Beschreibung der Feedbacknutzung im Allgemeinen recht dünn erscheint und darüber hinaus die Nutzung von Feedback in Studien unterschiedlich operationalisiert wird, wird keine Hypothese formuliert. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Nutzung des Feedbacks als heterogen beschreiben lässt.

Forschungsfrage 2: (Inwiefern) Haben Lernenden- und Feedbackereigenschaften einen Einfluss auf die Feedbackwahrnehmung sowie Feedbacknutzung der Lernenden?

Hypothese 2: Die Bruchrechenleistung (Mzp 1), Variablen bezogen auf digitale Medien, motivational-emotionale Variablen und die Feedbackpolung verändern die Wahrnehmung von Feedback.

Hypothese 2.1: Die Bruchrechenleistung (Mzp 1), Variablen bezogen auf digitale Medien, motivational-emotionale Variablen, die Feedbackwahrnehmung und die Feedbackpolung verändern die Nutzung von Feedback.

Die Feedbackwahrnehmung und -nutzung wurden in theoretischen Diskussionen und empirischen Arbeiten als wichtige Faktoren hinsichtlich des Einflusses von Feedback auf den Lernerfolg herausgestellt. Welche Lernenden Feedback wie wahrnehmen bzw. nutzen, gilt dabei allerdings noch als ungeklärt. Auch auf die Frage, ob die Feedbackpolung, also ob das Feedback positiv oder negativ ausfällt, einen Einfluss auf die Wahrnehmung und Nutzung von Feedback hat, wurde noch keine Antwort gefunden. Die potenziellen Lernenden- und Feedbackereigenschaften wie z. B. die Einstellungen gegenüber digitalen Medien und das Interesse an Mathematik wurden allerdings bereits theoretisch und empirisch als mögliche Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung und Nutzung von Feedback diskutiert. Aufgrund des Mangels an empirischen Erkenntnissen stellt sich weiterhin die Frage, welche Eigenschaften Lernende mitbringen müssen, damit diese Feedback als positiv wahrnehmen und es angemessen nutzen. Diesbezüglich gilt es die beiden ungerichteten Hypothesen 2 und 2.1 sowie die Modelle aus Abbildung 28 zu untersuchen. Bei den statistischen Analysen werden nicht nur die direkten Effekte der

einzelnen Variablen, sondern auch Interaktionseffekte zwischen den Variablen und der Feedbackgruppe berichtet.

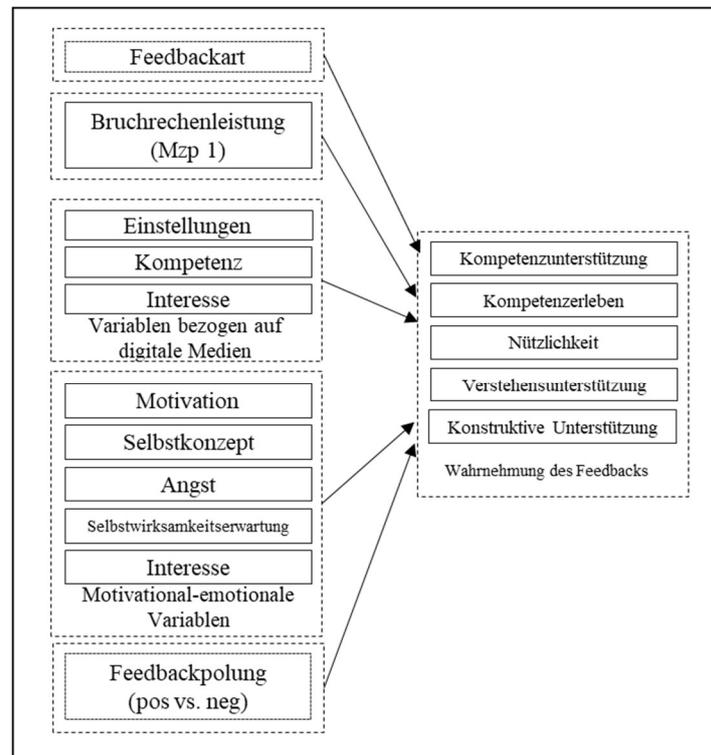


Abbildung 27: Modelle zum Einfluss verschiedener unabhängiger Variablen und der Feedbackwahrnehmung als abhängige Variable

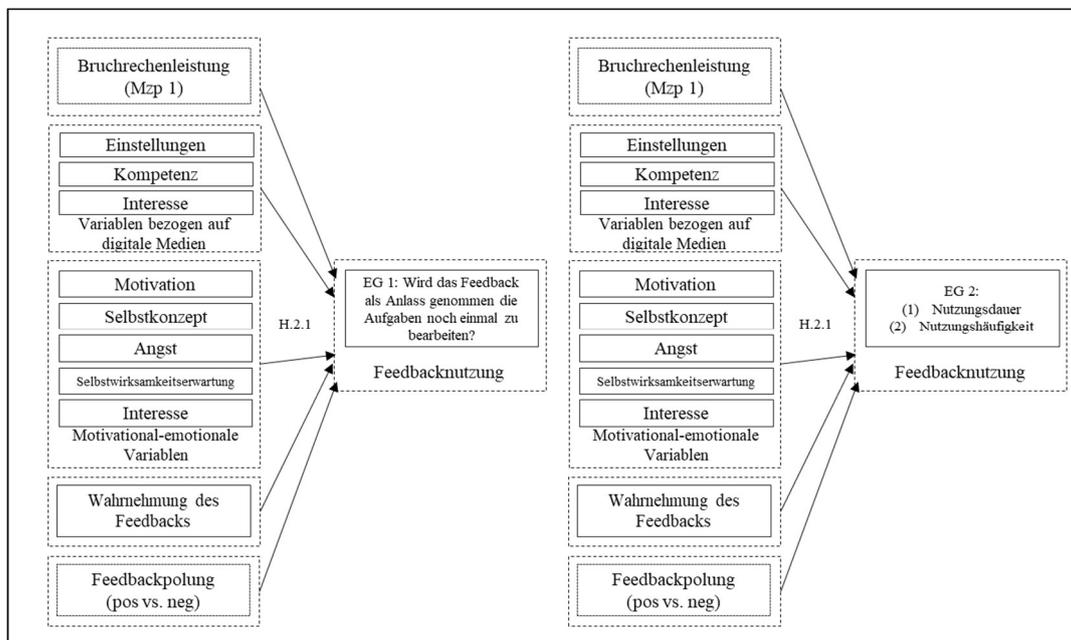


Abbildung 28: Modelle zum Einfluss verschiedener unabhängiger Variablen und der Feedbacknutzung als abhängige Variablen getrennt nach EG

Forschungsfrage 3: Mediert die Feedbackwahrnehmung den Effekt von Feedback auf die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen?

Hypothese 3: Das Feedback wirkt sich indirekt über die Feedbackwahrnehmung auf die Bruchrechenleistung (Mzp 2) der Lernenden aus.

Hypothese 3.1: Das Feedback wirkt sich indirekt über die Feedbackwahrnehmung auf die Motivation und Emotionen der Lernenden aus.

Der mediiierende Effekt der Perspektive von Schüler*innen fand speziell in der Feedbackforschung lange nur wenig Aufmerksamkeit. Unter anderem Ergebnisse des Co²Ca-Projekts deuten jedoch durchaus darauf hin, dass Feedback über die Feedbackwahrnehmung auf die mathematische Leistung der Lernenden wirkt. So muss Feedback erst als positiv (z. B. nützlich) angesehen werden, um die mathematische Leistung der Schüler*innen zu steigern. Dies gilt für Studien mit analogem Design sowie im Kontext digitaler Lernplattformen. Aufgrund der geringen Studienlage zu der Mediatorrolle der Feedbackwahrnehmung – insbesondere im Hinblick auf digitales Üben – ist ein Ziel dieser Arbeit, einen Beitrag zum besseren Verstehen der Wahrnehmung von Feedback und deren Einfluss auf die Bruchrechenleistung von Lernenden zu leisten (vgl. Abbildung 29).

So wie zum direkten Einfluss von Feedback auf Motivation und Emotionen wenig bekannt ist, gibt es bislang auch kaum Erkenntnisse zum indirekten Einfluss des Feedback moderiert über die Feedbackwahrnehmung auf Motivation und Emotionen (vgl. Abbildung 29). Es liegen jedoch Hinweise vor, dass eine positive Wahrnehmung die Voraussetzung positiv ausgeprägter Motivation und Emotionen ist. Daher wird vermutet, dass mit einer positiveren Wahrnehmung des Feedbacks auch eine höhere intrinsische Motivation, ein höheres situatives Interesse sowie ein geringeres Belastungsgefühl einhergeht.

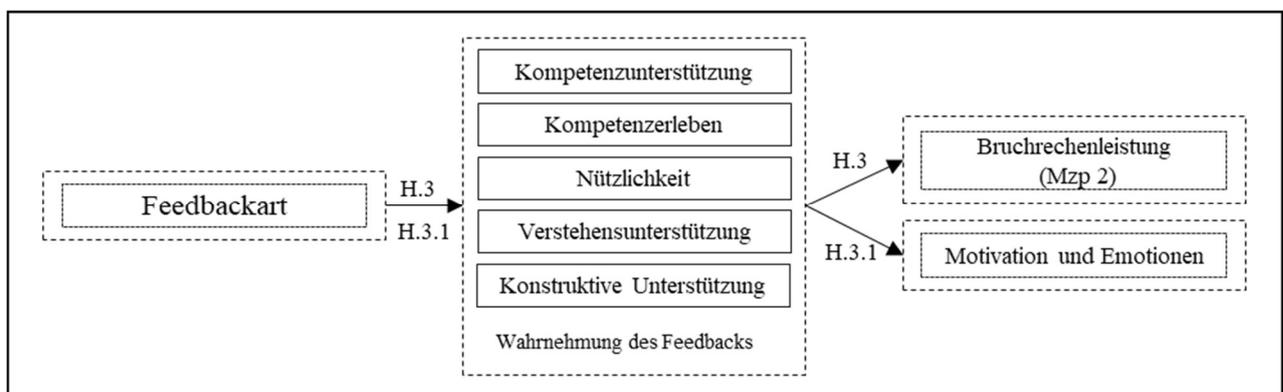


Abbildung 29: Modell zur Untersuchung des mediiierenden Effekts der Feedbackwahrnehmung auf die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen

Forschungsfrage 4: (Inwiefern) Beeinflusst die Feedbacknutzung die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen?

Hypothese 4: Je mehr das Feedback durch die Lernenden genutzt wird, desto höher fällt ihre Bruchrechenleistung (Mzp 2) aus.

Hypothese 4.1: Mit unterschiedlicher Feedbacknutzung geht auch eine unterschiedliche Ausprägung von Motivation und Emotionen einher.

Forschungsfrage 4 beschäftigt sich eingehender mit der Nutzung der beiden Feedbackarten KR und elaboriertes Feedback und dem Einfluss der Feedbacknutzung auf die Bruchrechenleistung und der Motivation und Emotionen (vgl. Abbildung 30). Feedback wird häufig als Information betrachtet, die der Leistungsverbesserung dienen soll. Andere Definitionen wiederum betonen die Notwendigkeit der Nutzung dieser Information, damit Informationen zu Feedback werden, denn erst die Nutzung (beispielsweise zur Fehlerkorrektur) führt zu einer Leistungsverbesserung. Außerdem weisen Studien darauf hin, dass die Feedbacknutzung Motivation und Emotionen beeinflussen kann. Aufgrund der unterschiedlichen Operationalisierung der Feedbacknutzung für die beiden EG erfolgen getrennte Analysen bezüglich des Einflusses der Feedbacknutzung auf die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen.

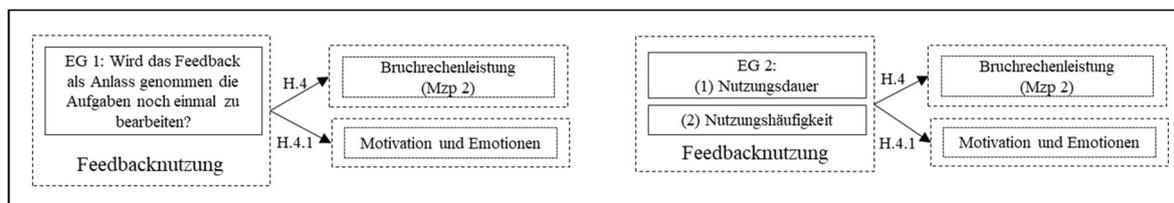


Abbildung 30: Modelle mit der Feedbacknutzung als unabhängige Variable und der Bruchrechenleistung (Mzp 2) sowie der Motivation und Emotionen als abhängige Variable getrennt nach EG

8 Auswertungsmethoden

Die Zusammenhänge der eingesetzten Variablen werden über *Korrelationsanalysen* dargestellt. Zusätzlich zu der Untersuchung der Korrelationen werden Gruppenvergleiche in Form von gepaarten sowie ungepaarten *t-Tests* gerechnet. Mithilfe von *Pfadanalysen* werden Wirkmodelle – als zentrales Ziel der vorliegenden Arbeit – untersucht. Dabei werden sowohl direkte als auch indirekte Effekte über verschiedene *Regressionsanalysen* (multiple, binär logistische) sowie *Mediations- und Moderationsanalysen* berechnet. Ergebnisse der Mediationsanalysen sollen unter Bezugnahme von grafischen Darstellungen genauer betrachtet. Anhand dieser Wirkmodelle soll beschrieben werden, inwiefern die Wahrnehmung und Nutzung zweier verschiedener

Feedbackarten – (1) ähnlich der Korrektur von Hausaufgaben, (2) aus lerntheoretischer Sicht förderliches Feedback – die Bruchrechenleistung von Siebtklässler*innen erklären und wie weitere Variablen die Wahrnehmung sowie das Nutzungsverhalten beeinflussen.

Die Ermittlung der Korrelationskoeffizienten sowie die Moderations- und Regressionsanalysen erfolgten mit der Software *IBM SPSS Statistics Version 28.0* (IBM, 2022). Die tiefergehenden grafischen Darstellungen der Moderationen mit binär kodierten Moderatoren wurden mit *Excel* unter Bezugnahme der Vorlage von Dawson (o. D.) durchgeführt. Wurde ein stetiger Moderator in die Moderationsanalysen aufgenommen, wurde der Rechner von Hemmerich (2020b) verwendet. Die Mediationsanalysen wurden in *R* durchgeführt, wobei das Package *lavaan* (Rosseel, 2012) Verwendung fand. Nachfolgend werden die statistischen Verfahren zur Auswertung der vorliegenden Daten genauer beleuchtet, die Ergebnisse der Analysen allerdings erst in Abschnitt D dieser Arbeit berichtet.

8.1 Korrelationsanalysen

Der Korrelationskoeffizient r wird der deskriptiven Statistik zugeordnet und gibt die Stärke des Zusammenhangs zweier Variablen an. Dabei kann r Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei $r = 0$ keinen Zusammenhang (Hug & Poschechnik, 2010), $r = .10$ einen kleinen Zusammenhang, $r = .30$ einen mittleren Zusammenhang und $r = .50$ einen starken Zusammenhang bedeutet (Cohen, 1988). In wissenschaftlichen Arbeiten werden meist lineare Zusammenhänge zweier intervallskalierter Variablen durch den Korrelationskoeffizienten nach Pearson (Produkt-Moment-Korrelation) berichtet (Rasch et al., 2021; Sedlmeier & Renkewitz, 2018) – wobei die Überprüfung linearer Zusammenhänge durch die Produkt-Moment-Korrelation aufgrund gleicher Abstände zwischen Messwerten und Merkmalsausprägungen auch für zwei nominalskalierte und dichotom kodierte Variablen zulässig ist (Sedlmeier & Renkewitz, 2018). Voraussetzungen zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson sind der lineare Zusammenhang zwischen den beiden Variablen, welcher sich optisch über Streudiagramme prüfen lässt sowie die Intervallskalierung und Normalverteilung¹⁶ beider Variablen (Heimsch, et al., 2018).

Da der Rangkorrelationskoeffizient von Spearman keine linearen, sondern monotone Zusammenhänge misst, kann dieser bei Verletzungen der Voraussetzungen statt des Korrelationskoeffizienten nach Pearson genutzt werden (Schlittgen, 2009). Die Werte der Rangkorrelation

¹⁶ Zur Erinnerung: Die Normalverteilung lässt sich über (1) die Schiefe und Kurtosis, (2) den Kolmogoroff-Smirnov-Test sowie (3) optisch über Diagramme prüfen.

befinden sich ebenfalls in einem Bereich von -1 = perfekter negativer Zusammenhang über 0 = kein Zusammenhang bis 1 = perfekter positiver Zusammenhang (Rasch et al., 2021).

Sollen Korrelationen zwischen einer intervallskalierten und einer dichotom skalierten Variable vorgenommen werden, geschieht dies unter Bezugnahme der punktbiserialen Korrelation (Bortz & Schuster, 2010).

8.2 Mittelwertvergleiche zweier Gruppen

Um die Mittelwerte zweier Gruppen zu vergleichen, eignet sich der Einsatz des t-Tests, auf Grundlage dessen festgestellt werden kann, ob ein Unterschied in den Mittelwerten rein zufällig oder systematisch auftritt. Hinsichtlich t-Tests wird zwischen ungepaarten (bzw. unabhängigen) und gepaarten (bzw. abhängigen) t-Tests unterschieden. Bezüglich des ungepaarten t-Tests werden die Mittelwerte zweier ungepaarter Stichproben untersucht. Ungepaart bedeutet, dass die Werte der beiden Gruppen keinen Einfluss aufeinander nehmen (Sedlmeier & Renkewitz, 2018). Gepaarte t-Test werden typischerweise bei der gleichen Stichprobe, die zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten untersucht wurde, angewandt (Döring & Bortz, 2016). Bezüglich der Effektgrößen wird Cohens d herangezogen. Für $d < .20$ liegt ein kleiner, für $d < .50$ ein mittlerer und $d < .80$ ein großer Effekt vor (Döring & Bortz, 2016).

Zur Durchführung eines t-Tests müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein (Rasch et al., 2021, S. 48):

- „Das untersuchte Merkmal ist intervallskaliert [...]
- Das untersuchte Merkmal ist in der Population normalverteilt [...]
- Die Populationsvarianzen, aus denen die beiden Stichproben stammen, sind gleich (Varianzhomogenität) [...]“

Studien belegen allerdings bei ausreichend großer Stichprobengröße ($n_1 = n_2 > 30$) eine Robustheit des t-Tests gegenüber Verletzungen der Voraussetzungen, weshalb bezüglich der Prüfung der Voraussetzungen eine deskriptive Kontrolle der Normalverteilung und die Anwendung des Levene-Test zur Überprüfung der Varianzhomogenität als ausreichend angesehen werden (Rasch et al., 2021; Döring & Bortz, 2016).

8.3 Pfadanalysen

Pfadmodelle gelten als ein Fall von Strukturgleichungsmodellen, wobei einzelne manifeste Variablen in die Modelle einbezogen werden (Werner et al., 2016). Dargestellt werden Pfadmo-

delle als Pfaddiagramme. Rechtecke repräsentieren dabei manifeste Variablen, Ellipsen wiederum latente Variablen (Geiser, 2011). Pfeile visualisieren gerichtete Zusammenhänge; durch Doppelpfeile werden Korrelationen dargestellt.

Regressionsanalysen:

Zum vollumfänglichen Verständnis von Pfadmodellen und ihren Analysen müssen vorerst Regressionsanalysen, die einen elementaren Teil von Pfadmodellen ausmachen, thematisiert werden. Unter Bezugnahme auf Regressionsanalysen kann der Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer oder mehrerer unabhängiger Variablen analysiert werden. Demnach dient eine Regressionsanalyse dazu, den erwartenden Wert einer abhängigen Variable durch den gegebenen Wert einer oder mehrerer unabhängiger Variablen vorherzusagen. Es wird zwischen linearen und nichtlinearen Regressionen unterschieden (Heimsch et al., 2018). Die Voraussetzungen für die Durchführung einer linearen Regression lauten wie folgt (Rasch et al., 2021, S. 116):

- „Das Kriterium muss intervallskaliert und normalverteilt sein.
- Der Prädiktor kann entweder intervallskaliert und normalverteilt sein oder dichotom nominalskaliert.
- Die Einzelwerte verschiedener Versuchspersonen müssen voneinander unabhängig zustande gekommen sein.
- Der Zusammenhang der Variablen muss theoretisch linear sein.
- Die Streuungen der zu einem x-Wert gehörenden y-Werte müssen über den ganzen Wertebereich von x homogen sein (Annahme der Homoskedastizität, [...]).“

Dabei lässt sich der lineare Zusammenhang optisch über Streudiagramme prüfen (Schlittgen, 2009). Sollte die Voraussetzung der Linearität verletzt sein, können nichtlineare Zusammenhänge durch Transformation (z. B. durch Logarithmieren) in lineare Zusammenhänge überführt werden (Sedlmeier & Reknwitz, 2018; Heimsch et al., 2018). Die Güte der Modelle wird anhand des Determinationskoeffizienten R^2 beurteilt und anhand dessen die Entscheidung für ein Modell getroffen. R^2 kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und gibt an, wie viel Varianz der abhängigen Variable die unabhängigen Variable(n) aufklären. Das heißt: Je höher der Determinationskoeffizient (auch „Bestimmtheitsmaß“ genannt), desto mehr Varianz wird aufgeklärt (Schendera, 2008).

Liegt ein linearer Zusammenhang vor und die abhängige Variable wird von einer unabhängigen Variable erklärt, spricht man von einer „einfachen linearen Regression“, wird mehr als eine

unabhängige Variable in das Regressionsmodell aufgenommen, handelt es sich um eine „multiple lineare Regression“. Die Güte der so entstandenen Modelle wird unter Bezugnahme des korrigierten Determinationskoeffizienten R^2 verglichen (Sedlmeier & Renkewitz, 2018; Schendera, 2008). Bei multiplen (linearen) Regressionen kann das Problem der Multikollinearität bei stark miteinander korrelierenden unabhängigen Variablen auftreten. Dies drückt sich durch stark unterschiedliche Werte oder auch Vorzeichen zweier unabhängiger Variablen aus, die aus theoretischer Sicht eine ähnliche Vorhersage in Bezug auf die abhängige Variable treffen sollten (Sedlmeier & Renkewitz, 2018). Statistisch kann Multikollinearität durch den sogenannten Varianzinflationsfaktor (VIF) geprüft werden (Schlittgen, 2009). Ein $VIF \geq 10$ kann auf eine Multikollinearität hinweisen (Chatterjee & Price, 1991).

Sollte die Voraussetzung der Normalverteilung verletzt sein, wird von manchen Autor*innen empfohlen, ein sogenanntes „Bootstrapp-Verfahren“ einzusetzen (Berkovits et al., 2000; Mackinnon et al., 2004; Schlittgen, 2009). Bootstrapping ist eine Methode des sogenannten „Resamplings“. Beim Bootstrapping werden aus einer Stichprobe eine festgelegte Anzahl neuer, künstlicher Stichproben erzeugt (Dümbgen, 2010). Die Erzeugung neuer Stichproben erfolgt durch das mehrfache Ziehen mit Zurücklegen neuer Stichproben aus dem Ursprungsdatensatz (Efron, 1979). Ein mögliches Verfahren ist das „bias-corrected bootstrapping“. Dieses weist laut Studien die höchste statistische Power auf, kann allerdings auch – insbesondere bei kleinen Stichproben – den Alpha-Fehler erhöhen (M. S. Fritz et al., 2012; Mackinnon et al., 2004).

Für einfache sowie multiple (lineare) Regressionen gilt, dass die unabhängigen Variablen metrisch sowie nominalskaliert sein können. Nominalskalierte Variablen müssen jedoch dummykodiert sein (Eid et al., 2010). Ist die abhängige Variable nominalskaliert, wird eine logistische Regression herangezogen (Backhaus et al., 2016).

Mediationsanalysen:

Mediationsanalysen lassen sich zu den Pfadanalysen zählen. Pfadanalysen wiederum können als „Kombination mehrerer simultaner Regressionsanalysen“ (Döring & Bortz, 2016, S. 952) interpretiert werden. Variablen können dabei die Rolle einer abhängigen sowie unabhängigen Variable einnehmen, sogenannte Mediatorvariablen, wodurch neben der Analyse direkter Effekte (= „normale“ Regression) auch die Analyse indirekter Effekte möglich ist (Döring & Bortz, 2016; Kopp & Lois, 2012; Sedlmeier & Renkewitz, 2018) (vgl. Abbildung 31). Eine Mediatorvariable „is defined as a variable that explains the relation between a predictor and an

outcome“ (Frazier et al., 2004, S. 116). So kann es vorkommen, dass der Effekt einer unabhängigen Variable auf die abhängige Variable nur durch den indirekten Pfad über die Mediatorvariable zustande kommt (Frazier et al., 2004).

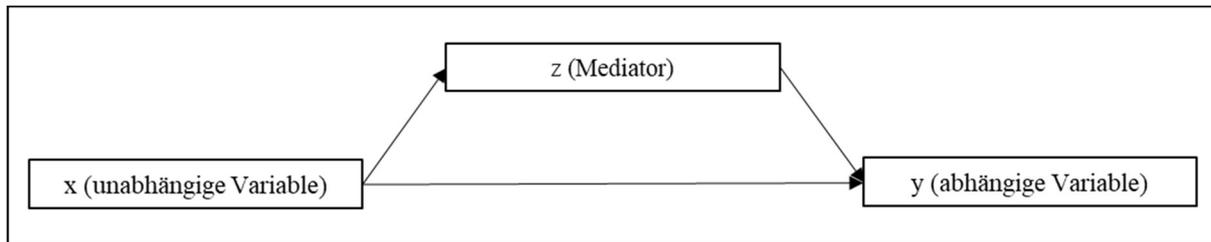


Abbildung 31: Schematische Darstellung einer Mediation, eigene Darstellung adaptiert nach Kopp und Lois (2012)

Moderationsanalysen:

Innerhalb von Moderationsanalysen wird ebenfalls eine Drittvariable in das Regressionsmodell aufgenommen (vgl. Abbildung 32). Dabei gilt für die Drittvariable: „Sie [die Drittvariablen] können die Bedingungen angeben, unter welchen der Einfluss einer unabhängigen Variablen x auf eine abhängige Variablen y stärker oder schwächer ist“ (Kopp & Lois, 2012, S. 149). Moderationsanalysen verfolgen unter anderem den Zweck Zusammenhänge, die nur unter bestimmten Bedingungen auftreten, zu erfassen (Kopp & Lois, 2012). Moderationsanalysen können demnach die Fragen „wann“ oder „für wen“ der Effekt der unabhängigen Variable auf die abhängige Variable gilt und stellen demnach die Interaktion zwischen der unabhängigen und der Moderatorvariable dar (Frazier et al., 2004). Bei der Analyse von potenziellen Moderatoren werden häufig sogenannte hierarchische Regressionen durchgeführt, bei denen in einem ersten Schritt nur ein oder mehr Prädiktor(en) in das Modell aufgenommen werden und in einem zweiten Schritt die Interaktionen untersucht werden (Frazier et al., 2004). Hinsichtlich der Voraussetzungen für Moderationsanalysen, also auch für Mediationsanalysen können die Kriterien der linearen Regression herangezogen werden. Hayes (2018) postuliert bezüglich der Voraussetzung allerdings: „[...] I do not believe you should lose too much sleep over the potential that you have violated one or more of those assumptions“ (S. 68–69).

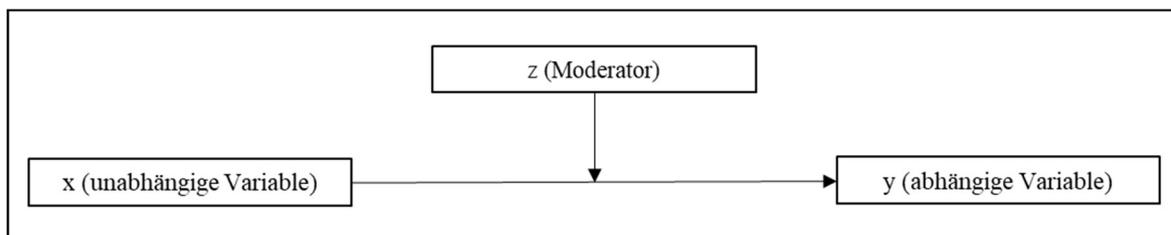


Abbildung 32: Schematische Darstellung einer Moderation, eigene Darstellung adaptiert nach Kopp und Lois (2012)

Moderationsanalysen können mit kategorialen als auch stetigen Moderatorvariablen durchgeführt werden (Cohen et al., 2003). Dabei wird als Vorbereitung auf die Analysen die z-Standardisierung der Moderator- als auch der unabhängigen Variable empfohlen (Aiken & West, 1991; Cohen et al., 2003; Frazier et al., 2004). Anschließend wird das Produkt aus den standardisierten Werten der Moderator- und unabhängigen Variable als Vorbereitung zur Analyse des Interaktionseffekts berechnet. Wird mit standardisierten Daten gerechnet, wird empfohlen unstandardisierte Koeffizienten (B) zu berichten (Cohen et al., 2003; Frazier et al., 2004). Erscheinen die Interaktionen zwischen Moderatorvariable und unabhängiger Variable als signifikant, können grafische Darstellungen die Interpretation der Interaktionen erleichtern. Eine Möglichkeit zur tiefergehenden Analyse der Interaktionen ist die grafische Darstellung in Form sogenannter „simple slopes“. Die Verwendung von „simple slopes“ bietet sich vor allem für binär kodierte Moderatorvariablen an (Aiken & West, 1991; Cohen et al., 2003). Verhält sich der Moderator allerdings stetig, können Johnson-Neyman-Diagramme angewandt werden (Johnson & Neyman, 1963).

Abschnitt D Ergebnisse

1 Einführung

Mit Blick auf die in Abschnitt C, Kapitel 7 dargestellten Forschungsfragen, Hypothesen sowie Modelle werden die Ergebnisse zur Analyse der zentralen Variablen „Feedbackwahrnehmung“, „Feedbacknutzung“, „Bruchrechenleistung“ und „Motivation und Emotionen“ von Lernenden genauer beleuchtet. Die Bruchrechenleistung wird jeweils in ein Gesamtergebnis sowie die Ergebnisse zum konzeptuellen und prozeduralen Wissen zur Bruchrechnung unterteilt. Unter expliziter Nennung der konkreten Forschungsfragen baut sich der Bericht der Ergebnisse wie folgt auf: Zuerst werden auf deskriptiver Ebene die zentralen Variablen berichtet sowie auf signifikante Gruppenunterschiede¹⁷ geprüft (Kapitel 2). Um mögliche Erklärungen für die Wahrnehmung und Nutzung von Feedback zu finden, bzw. den Fragen nachzugehen, unter welchen Bedingungen Feedback als positiv wahrgenommen und genutzt wird, werden mögliche Einflussfaktoren auf die Feedbackwahrnehmung und -nutzung untersucht (Kapitel 3). In Kapitel 4 werden die Feedbackwahrnehmung und -nutzung als unabhängige Variablen betrachtet und ihr Einfluss auf die Bruchrechenleistung sowie Motivation und Emotionen genauer analysiert. Innerhalb der einzelnen Kapitel werden die zur Beantwortung der jeweiligen Forschungsfrage eingesetzten Auswertungsmethoden (vgl. Abschnitt C, Kapitel 8) benannt und die vorliegenden Daten auf die notwendigen Voraussetzungen eben dieser Methoden überprüft, um anschließend die Analyseergebnisse zu berichten.

¹⁷ Es gilt vorweg zu sagen, dass für die Feedbacknutzung lediglich deskriptive Daten berichtet werden, da aufgrund unterschiedlicher Operationalisierung ein Vergleich der EG als nicht sinnvoll erscheint.

Aufgrund der Vielzahl an eingesetzten und untersuchten Variablen stellt nachfolgende Tabelle 16 eine Zusammenfassung der verwendeten Abkürzungen dar, um auf die Lesbarkeit der Tabellen vorzubereiten und den Ergebnisberichten bestmöglich folgen zu können.

Tabelle 16: Verzeichnis der in den Tabellen verwendeten Abkürzungen

Abkürzung	Begriff
EG	Experimentalgruppe
Gr	Gruppe
Leistungsvariablen	
LeistGes1	Gesamtergebnis des Bruchrechentests (Mzp 1)
LeistGes2	Gesamtergebnis des Bruchrechentests (Mzp 2)
LeistKonz1	Konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung (Mzp 1)
LeistKonz2	Konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung (Mzp 2)
LeistProz1	Prozedurales Wissen zur Bruchrechnung (Mzp 1)
LeistProz2	Prozedurales Wissen zur Bruchrechnung (Mzp 2)
KognFäh	Kognitive Fähigkeiten
LeseFäh	Lesefähigkeiten
Motivation und Emotionen	
IntrMot	Intrinsische Motivation
SitInt	Situatives Interesse
Bel	Belastung
Feedbackwahrnehmung	
WKompUnt	Wahrgenommene Kompetenzunterstützung
WKompErl	Wahrgenommenes Kompetenzerleben
WNützlich	Wahrgenommene Nützlichkeit
WVerstUnt	Wahrgenommene Verstehensunterstützung
WKonstUnt	Wahrgenommene konstruktive Unterstützung
Feedbacknutzung	
NutzDauGes	Feedbacknutzungsdauer gesamt
NutzDauDef	Feedbacknutzungsdauer der Hilfe „Definition“
NutzDauTip	Feedbacknutzungsdauer der Hilfe „Tipp“
NutzDauNsc	Feedbacknutzungsdauer der Hilfe „Nachschlagen“
NutzDauLös	Feedbacknutzungsdauer der Hilfe „Lösung“
NutzHäufGes	Feedbacknutzungshäufigkeit gesamt
NutzHäufDef	Feedbacknutzungshäufigkeit der Hilfe „Definition“
NutzHäufTip	Feedbacknutzungshäufigkeit der Hilfe „Tipp“
NutzHäufNsc	Feedbacknutzungshäufigkeit der Hilfe „Nachschlagen“
NutzHäufLös	Feedbacknutzungshäufigkeit der Hilfe „Lösung“
NutzFb EG 1	Feedbacknutzung der Experimentalgruppe 1
Feedbackpolung (pos. vs. neg.)	
HäufFbPos	Häufigkeit positiven Feedbacks
HäufFbNeg	Häufigkeit negativen Feedbacks
Variablen bezogen auf digitale Medien	
DigMedEinst	Einstellungen gegenüber digitalen Medien
DigMedKomp	Selbstberichtete Kompetenzen bezogen auf digitale Medien
DigMedInt	Interesse an digitalen Medien
Motivational-emotionale Variablen (Mathematik)	
MathMot	Motivation bezogen aufs Fach Mathematik
MathSk	Selbstkonzept bezogen aufs Fach Mathematik
MathAng	Mathematikangst
MathSwe	Selbstwirksamkeitserwartung bezogen aufs Fach Mathematik
MathInt	Interesse am Fach Mathematik

Vor der Analyse zur Beantwortung der Forschungsfragen sollen allerdings im Zuge von **ungepaarten t-Tests** die EG 1 und EG 2 hinsichtlich der Variablen „Bruchrechenleistung (Mzp 1)“, „allgemeine kognitive Fähigkeiten“ und „Lesefähigkeiten“ miteinander verglichen werden, um zu überprüfen, inwieweit die Parallelisierung gelungen ist. Die Variablen wurden auf die Voraussetzungen der Normalverteilung und Varianzhomogenität zur Berechnung von t-Tests untersucht. Die Daten lassen sich für die Bruchrechenleistung (Mzp 1) als tendenziell linkssteil beschreiben (vgl. Anhang 7). Für die allgemeinen kognitiven Fähigkeiten sowie die Lesefähigkeiten liegt eine Normalverteilung vor (vgl. Anhang 8). Auch wenn die Daten zu der Bruchrechenleistung (Mzp 1) als nicht normalverteilt erscheinen, wird der parametrische t-Test angewandt, da dieser gegenüber der Verletzung der Normalverteilung als robust gilt (Rasch et al., 2021). Der Levene-Test zeigt sowohl für die Bruchrechenleistung (Mzp 1) als auch für die kognitiven und Lesefähigkeiten die Erfüllung der Voraussetzung der Varianzhomogenität.

Bezüglich der Bruchrechenleistung (Mzp 1) erzielen die Lernenden im Mittel 11 Punkte (SD = 8.82), was bei maximal 37 zu erreichenden Punkten rund 30 % der Maximalpunktzahl entspricht. Die deskriptiven Ergebnisse deuten auf eine eher leistungsschwache Stichprobe hin. Die Mittelwerte der beiden EG unterscheiden sich nur geringfügig von dem durchschnittlichen Punkten der Gesamtstichprobe. Die Mittelwerte des konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung schwanken um den Mittelwert des Gesamttestergebnisses, wobei das konzeptuelle Wissen in der Tendenz geringer ausgeprägt ist als das prozedurale Wissen zur Bruchrechnung. Ausgehend von diesen Werten zeigen sich im direkten Vergleich der beiden EG unter Bezugnahme von ungepaarten t-Tests keine signifikanten Unterschiede (vgl. Tabelle 17). Allgemein lässt sich sagen, dass die beiden EG hinsichtlich der Bruchrechenleistung, der kognitiven sowie der Lesefähigkeiten zu Mzp 1 vergleichbar sind und die Parallelisierung demnach gelungen ist.

Tabelle 17: Deskriptive Ergebnisse des Test zur Erhebung des Vorwissens zur Bruchrechnung, der allgemeinen kognitiven Fähigkeiten und der Lesefähigkeiten sowie Mittelwertsunterschiede nach EG

	n	Min	Max	MW	MW (%)	SD	
Bruchrechenleistung (Mzp 1)							
LeistGes1	137	0	32	11.08	29.95	8.82	
EG 1	70	0	31	11.43	30.89	8.66	t(135) = 0.47, p = .64, d = 0.08
EG 2	67	0	32	10.72	28.97	9.03	
LeistKonz1	137	0	15	5.53	29.11	3.99	
EG 1	70	0	15	5.87	30.89	3.91	t(135) = 1.04, p = .30, d = 0.18
EG 2	67	0	15	5.16	27.16	4.08	
LeistProz1	137	0	18	5.55	30.83	5.40	
EG 1	70	0	18	5.56	30.89	5.35	t(135) = 0.01, p = .99, d = 0.00
EG 2	67	0	17	5.55	30.83	5.49	
KognFäh	137	0	65	39.61		13.44	
EG 1	70	0	65	38.77		13.43	t(135) = -0.74, p = .46, d = 0.12
EG 2	67	0	65	40.48		13.49	
LeseFäh	137	0	99	54.69		21.72	
EG 1	70	0	99	53.34		21.67	t(135) = -0.74, p = .46, d = 0.13
EG 2	67	0	92	56.09		21.82	

EG = Experimentalgruppe

Maximal zu erreichende Punktzahlen: LeistGes = 37, LeistKonz = 19, LeistProz = 18

d wurde berechnet mit: Hemmerich (2015) (zweiseitiger Test)

2 Deskriptive Ergebnisse und statistische Unterschiede der beiden Feedbackbedingungen

Forschungsfrage 1: (Inwiefern) Unterscheiden sich die beiden Feedbackbedingungen hinsichtlich der Bruchrechenleistung (Mzp 2), der Motivation und Emotionen sowie der Feedbackwahrnehmung?

Zur Beantwortung der Frage, ob sich die zwei verschiedenen Feedbackbedingungen in ihrer Bruchrechenleistung (Mzp 2) unterscheiden, wurden die Mittelwerte unter Verwendung **ungepaarter t-Tests** miteinander verglichen. Wie gezeigt wurde, sind die beiden EG zu Beginn der Interventionsstudie aufgrund der Parallelisierung unter anderem hinsichtlich der Bruchrechenleistung (Mzp 1) vergleichbar. So lassen sich anhand von Gruppenunterschieden hinsichtlich der Bruchrechenleistung nach der Intervention (Mzp 2) Rückschlüsse auf den höheren Erfolg des Feedbacks einer der EG ziehen. Zur Erinnerung: Die Bruchrechenleistung wird nach dem Gesamttestergebnis sowie dem konzeptuellen und prozeduralen Wissen zur Bruchrechnung getrennt. Zusätzlich werden **gepaarte t-Test** durchgeführt, um zu überprüfen, ob eine Veränderung zwischen den Gruppen hinsichtlich der Bruchrechenleistung von Mzp 1 zu 2 festzustellen ist. Dazu wird vorerst analysiert, ob die Gesamtstichprobe eine Veränderung in der Bruchrechenleistung aufweist und anschließend die Mittelwertsunterschiede von Mzp 1 zu 2 der beiden

EG verglichen (**ungepaarte t-Test**)^{18,19}. Als eine weitere Facette von Lernerfolg wird neben der Bruchrechenleistung ebenfalls untersucht, ob sich die beiden EG hinsichtlich der Motivation und Emotionen unterscheiden. Darüber hinaus werden die EG hinsichtlich der Feedbackwahrnehmung als potenzielle Einflussvariable auf den Lernerfolg durch **ungepaarte t- Tests** verglichen.

Als Vorbereitung auf die Analysen werden die Variablen auf die Erfüllung der Voraussetzungen zur Durchführung von t-Tests geprüft. Die Verteilung der Bruchrechenleistung (Mzp 2) verhält sich linkssteil²⁰. Die Subskala „intrinsische Motivation“ der Motivation und Emotionen erfüllt die Voraussetzung der Normalverteilung. Das situative Interesse verhält sich jedoch linkssteil und die Belastung rechtssteil. Die Subskalen der Feedbackwahrnehmung verhalten sich alle annähernd normalverteilt (vgl. Anhang 9). Levene-Tests bestätigten die Varianzhomogenität für alle Skalen, so dass die Voraussetzung der Varianzhomogenität als erfüllt gilt. Da eine ausreichend große Stichprobe vorliegt und die t-Tests damit robust gegenüber der Verletzung der Normalverteilung sind, werden wie geplant t-Tests zum Vergleich der beiden EG vorgenommen.

Die Gesamtstichprobe erreicht zum zweiten Mzp im Mittel 13.42 Punkte. Die deskriptiven Ergebnisse aus Tabelle 18 legen nahe, dass die beiden EG zum zweiten Mzp ähnliche Ergebnisse erreichen mit einer leichten Tendenz der höheren Bruchrechenleistung von EG 2, also den Lernenden, die elaboriertes Feedback erhielten. Ungepaarte t-Tests bestätigen diese Annahme und zeigen keine signifikanten Unterschiede in der Bruchrechenleistung (Mzp 2) zwischen den EG (vgl. Tabelle 18). Allerdings verbessern sich die Lernenden signifikant im Mittel vom ersten zum zweiten Mzp sowohl im Gesamtergebnis als auch hinsichtlich des konzeptuellen und prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung. Es zeigen sich im direkten Vergleich zwischen den beiden Mzp signifikante Unterschiede (es gilt: $0.41 \leq d \leq 0.48$ mit $p < .001$; vgl. Tabelle 19).

¹⁸ Aufgrund einer potenziell variierenden Itemschwierigkeit und damit zur Schaffung einer besseren Vergleichbarkeit werden die t-Tests zum Vergleich der beiden Mzp mit raschskalierten Werten berechnet. Das dichotome Raschmodell geht von zwei möglichen Reaktionen auf ein Item aus (z. B. 0 = nicht korrekt, 1 = korrekt gelöst). Durch die Funktion $P(X_{vi} = x_{vi} | \theta_v, \beta_i) = \frac{\exp[x_{vi}(\theta_v - \beta_i)]}{1 + \exp(\theta_v - \beta_i)} = p_{vi}$ kann die Reaktionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von Personen- sowie Itemparametern beschrieben werden (Koller et al., 2012). Zentrales Merkmal von Raschmodellen ist also, dass Personenparameter (die Fähigkeit des Probanden/der Probandin) sowie Itemparameter (die Itemschwierigkeit) auf derselben Skala abgebildet werden können (Krüger et al., 2014; Döring & Bortz, 2016). Die Voraussetzung zur Raschskalierung (vgl. dazu Döring & Bortz, 2016, S. 489) gelten für den Bruchrechentest als erfüllt.

¹⁹ Als weitere Möglichkeit zum Vergleich zweier Messpunkte gilt die mixed ANOVA. Die Ergebnisse sind im Anhang 16 dargestellt.

²⁰ Die linkssteile Verteilung der Bruchrechenleistung (Mzp 2) weist auf eine eher leistungsschwache Stichprobe hin. Erklärungen lassen sich in der Wahl der Schulen (Gemeinschaft- und Oberschulen) sowie mit den pandemiebedingten Lernrückständen vermuten.

Den Konventionen nach Cohen folgend entspricht das kleinen Effekten (vgl. Abschnitt C, Kapitel 8.2).

Beim Vergleich der beiden EG hinsichtlich der Bruchrechenleistung von Mzp 1 und 2 verbessern sich die Lernenden, die elaboriertes Feedback erhalten haben (EG 2), im Vergleich zu EG 1 mehr – dies gilt sowohl für das Gesamtergebnisse als auch das konzeptuelle sowie prozedurale Wissen zur Bruchrechnung. Die Unterschiede erscheinen allerdings als nicht signifikant (vgl. Tabelle 20). Da eine Lehrkraft die Bruchrechnung mit einer Klasse ($n = 11$) zwischen den Mzp wiederholte, wurden die Analysen ebenfalls unter Ausschluss eben dieser Proband*innen durchgeführt. Die Unterschiede in den Ergebnissen erweisen sich jedoch als gering (vgl. Anhang 11).

Hinsichtlich der Motivation und Emotionen der Lernenden schwankt der Mittelwert der drei Subskalen (intrinsische Motivation, situatives Interesse, Belastung) jeweils nur gering zwischen den EG. Dabei liegen die intrinsische Motivation und das situative Interesse im Mittel auf einem ähnlichen Niveau (intrinsische Motivation = $2.68 \leq M \leq 2.73$; situatives Interesse = $2.63 \leq M \leq 2.64$). Bei Einordnung der Mittelwerte auf der verwendeten Likert-Skala von 1 bis 4 (1 = Stimme überhaupt nicht zu, 2 = Stimme eher nicht zu, 3 = Stimme eher zu, 4 = Stimme zu) bedeutet dies im Schnitt eine mittelmäßige intrinsische Motivation und situatives Interesse. Die selbsteingeschätzte Belastung der Schüler*innen verhält sich beim Vergleich der EG ebenfalls auf einem ähnlichen mittleren Niveau, ist im Gegensatz zu den beiden anderen Subskalen allerdings im Mittel niedriger ausgeprägt (Belastung = $1.94 \leq M \leq 1.95$), was sich auch im empirischen Maximum widerspiegelt. Während dieses für die intrinsische Motivation und das situative Interesse bei Max = 4.0 liegt, hat keiner der Teilnehmenden für die Belastung alle drei Items mit „Stimme zu“ beantwortet (Max = 3.67). Im Mittel fühlen sich die Lernenden also motivierter und zeigen ein höheres situatives Interesse, als dass sie sich durch das Arbeiten mit einer digitalen Lernplattform belastet fühlen. Aufgrund der annähernd gleichen Mittelwerte beider EG bezüglich der Subskalen ist zu vermuten, dass kein signifikanter Gruppenunterschied hinsichtlich der Motivation und Emotionen der Lernenden vorliegt. Ungepaarte t-Tests bestätigen diese Annahme (vgl. Tabelle 21).

Die Wahrnehmungsskalen liegen innerhalb eines mittleren Niveaus, wobei das wahrgenommene Kompetenzerleben im Mittel als am schwächsten ($M = 2.38$) und die wahrgenommene Nützlichkeit ($M = 2.82$) als am stärksten eingestuft wurde. Beim Vergleich der beiden EG erscheinen die Mittelwerte als ähnlich. Lernende, die KR (EG 1) erhielten, scheinen sich im Vergleich zu Lernenden, die mit elaborierten Feedback (EG 2) arbeiteten, im Mittel durch das

Feedback in ihrer Kompetenz unterstützter gefühlt sowie das Feedback als nützlicher empfunden zu haben. Im Gegensatz dazu bewerten die Lernenden der EG 2 das wahrgenommene Kompetenzerleben, die wahrgenommene Verstehensunterstützung und die wahrgenommene konstruktive Unterstützung im Mittel besser. Ein Vergleich der Mittelwerte der Subskalen durch t-Tests ergibt eine ähnliche Wahrnehmung des Feedbacks der Lernenden (vgl. Tabelle 21).

Tabelle 18: Deskriptive Ergebnisse der Tests zur Erhebung der Bruchrechenleistung sowie Mittelwertsunterschiede nach EG

	n	Min	Max	MW	MW (%)	SD	
Bruchrechenleistung (Mzp 2)							
LeistGes2	137	0	36	13.42	36.27	8.96	
EG 1	70	1	33	13.34	36.05	9.11	t(135) = -0.10, p = .46, d = -0.02
EG 2	67	0	36	13.49	36.46	8.87	
LeistKonz2	137	0	18	6.72	35.37	4.12	
EG 1	70	1	17	6.70	35.26	3.97	t(135) = -0.04, p = .45, d = -0.01
EG 2	67	0	18	6.73	35.42	4.30	
LeistProz2	137	0	18	6.70	37.22	5.31	
EG 1	70	0	18	6.64	36.89	5.53	t(135) = -0.13, p = .45, d = -0.02
EG 2	67	0	18	6.76	37.56	5.12	

d wurde berechnet mit: Hemmerich (2015) (zweiseitiger Test)

Tabelle 19: Mittelwertsunterschiede der Bruchrechenleistung nach Mzp

	MW Mzp 1	MW Mzp 2	MW _{Diff} (Mzp 2 – Mzp 1)	SD _{Diff}	
LeistGes	-1.18	-0.64	0.54	1.13	t(136) = -5.61, p < .001; d _z = 0.48
LeistKonz	-0.81	-0.27	0.54	1.24	t(136) = -5.10, p < .001; d _z = 0.44
LeistProz	-0.06	0.44	0.49	1.20	t(136) = -4.78, p < .001; d _z = 0.41

d_z wurde berechnet mit: Hemmerich (2020a) (zweiseitiger Test)

Tabelle 20: Mittelwertsunterschiede nach Mzp und EG

	MW _{Diff} EG 1	SD _{Diff} EG 1	MW _{Diff} EG 2	SD _{Diff} EG 2	
LeistGes	0.41	1.08	0.67	1.18	t(135) = -1.35, p = .36, d = -0.23
LeistKonz	0.37	1.24	0.72	1.23	t(135) = -1.70, p = .20, d = -0.28
LeistProz	0.42	1.15	0.56	1.26	t(135) = -0.67, p = .60, d = -0.12

d wurde berechnet mit: Hemmerich (2015) (zweiseitiger Test)

Tabelle 21: Deskriptive Ergebnisse der Tests zur Erhebung der Motivation und Emotionen und Feedbackwahrnehmung sowie Mittelwertsunterschiede nach EG

	n	Min	Max	MW	SD	
Motivation und Emotionen						
IntrMot	137	1.00	4.00	2.70	0.76	
EG 1	70	1.00	4.00	2.73	0.71	t(135) = 0.43, p = .68, d = 0.07
EG 2	67	1.00	4.00	2.68	0.81	
SitIntr	137	1.00	4.00	2.64	0.79	
EG 1	70	1.00	4.00	2.64	0.73	t(135) = 0.12, p = .99, d = 0.02
EG 2	67	1.00	4.00	2.63	0.85	
Bel	137	1.00	3.67	1.94	0.63	
EG 1	70	1.00	3.67	1.94	2.67	t(135) = -0.11, p = .82, d = 0.01
EG 2	67	1.00	3.67	1.95	0.61	
Feedbackwahrnehmung						
WKompUnt	137	1.00	4.00	2.65	0.62	
EG 1	70	1.20	4.00	2.70	0.62	t(135) = 1.03, p = .30, d _z = 0.18
EG 2	67	1.00	3.60	2.59	0.63	
WKompErl	137	1.00	4.00	2.38	0.64	
EG 1	70	1.00	4.00	2.37	0.66	t(135) = -0.21, p = .84, d _z = -0.05
EG 2	67	1.00	3.67	2.40	0.62	
WNützlich	137	1.00	4.00	2.82	0.69	
EG 1	70	1.00	4.00	2.91	0.74	t(135) = 1.51, p = .14, d _z = 0.23
EG 2	67	1.00	3.67	2.73	0.74	
WVerstUnt	137	1.00	3.75	2.61	0.62	
EG 1	70	1.00	3.75	2.58	0.65	t(135) = -0.65, p = .52, d _z = -0.11
EG 2	67	1.00	3.75	2.65	0.65	
WKonstUnt	137	1.00	4.00	2.60	0.66	
EG 1	70	1.25	3.75	2.54	0.62	t(135) = -0.98, p = .32, d _z = -0.17
EG 2	67	1.00	4.00	2.65	0.69	

d wurde berechnet mit: Hemmerich (2015) (zweiseitiger Test)

Forschungsfrage 1.1: Inwiefern nutzen die Lernenden das angebotene Feedback der Lernplattform?

Neben den in Forschungsfrage 1 genannten Variablen stellt auch die Feedbacknutzung eine zentrale Variable dieser Arbeit dar. Wie schon in den theoretischen Vorüberlegungen (Abschnitt B) dargelegt, kann Feedback noch so gut gestaltet sein und von den Lernenden als positiv wahrgenommen werden, wenn es nicht oder nicht ausreichend von den Schüler*innen genutzt wird, wird das Feedback kaum einen Beitrag zum Lernerfolg leisten (können). Die Operationalisierung der Feedbacknutzung stellt sich jedoch als anspruchsvoll dar. In Abschnitt C, Kapitel 5.7 wurde ausführlich erläutert, wie die Feedbacknutzung der beiden EG in dieser Arbeit erfasst wurde. Die gewählten Methoden zur Operationalisierung der Nutzung von Feedback werden nachfolgend erneut umrissen. Da die Feedbacknutzung der beiden EG unter-

schiedlich operationalisiert wurde, erscheint ein Vergleich der beiden EG hinsichtlich der Feedbacknutzung als nicht sinnvoll, weshalb an dieser Stelle lediglich deskriptive Werte der Feedbacknutzung berichtet werden und auf Gruppenvergleiche verzichtet wird.

EG 1 „KR“:

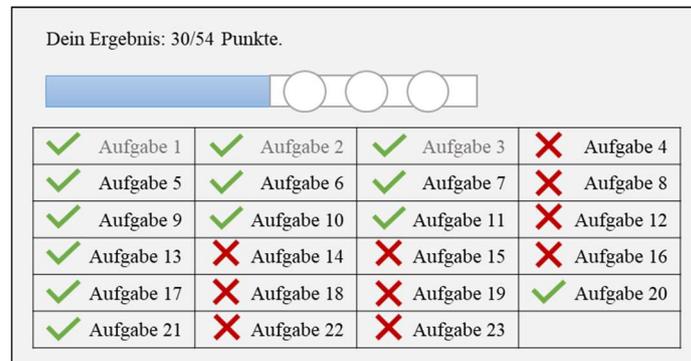


Abbildung 33: Beispielhaftes Feedback der EG 1

Das Nutzungsverhalten des Feedbacks wurde für EG 1 über die freiwillige Entscheidung zur Nutzung eines zweiten Versuchs, nachdem die Lernenden das Feedback in Form korrekt und inkorrekt gelöster Aufgaben erhalten hatten, operationalisiert (vgl. Abbildung 33). Es wurde demnach zwischen denjenigen Schüler*innen, die das Feedback für eine Überarbeitung ihrer Lösung als Anlass nahmen, und solchen Schüler*innen, die sich mit den inkorrekten Lösungen nicht erneut auseinandersetzten, unterschieden. Diesbezüglich gilt darauf hinzuweisen, dass keiner der Lernenden der EG 1 alle Aufgaben korrekt gelöst hat. Alle Lernenden hätten sich also mit falschen Aufgabenlösungen befassen können. Von den insgesamt 70 Lernenden der EG 1 haben sich lediglich 19 (27,1 %) mit den falsch bearbeiteten Aufgaben ein zweites Mal auseinandergesetzt. 50 Lernende (71,4 %) nahmen keinen zweiten Versuch in Anspruch und nutzten das Feedback demnach nicht. Für einen Schüler konnte nicht nachvollzogen werden, ob ein zweiter Versuch genutzt wurde oder nicht, dieser wurde daher hinsichtlich der Feedbacknutzung als fehlend kodiert.

EG 2 „elaboriertes Feedback“:

Die Feedbacknutzung der EG 2 wurde über die durch die Lernplattform bereitgestellten Hilfen als Teil von Feedback untersucht. Mithilfe von Bildschirmaufnahmen wurden (1) die Dauer und (2) die Häufigkeit, die eine Hilfe aufgerufen wurde, als Indikatoren für die Feedbacknutzung analysiert. Als Hilfen werden die in Abschnitt C, Kapitel 4.2.2 beschriebenen, von der Lernplattform angebotenen Elemente gezählt (Definition, Tipp, Nachschlagen, Lösung). Tabelle 22 fasst die deskriptiven Werte für die Feedbacknutzung der EG 2 zusammen. Es gilt

vorab anzumerken, dass nicht alle Lernenden die volle Bearbeitungszeit von 30 Minuten nutzten. So bearbeiteten die Lernenden die Bruchrechenaufgaben im Mittel innerhalb von 19,48 Minuten. Dabei wird eine große Varianz bezüglich der Feedbacknutzung anhand der hohen Standardabweichungen ($21.04 \leq SD_{\text{Dauer}} \leq 123.93$; $1.97 \leq SD_{\text{Häufigkeit}} \leq 13.81$) deutlich. Bezogen auf die hohe Varianz fällt ebenfalls die hohe Spannweite zwischen dem empirischen Minimum und Maximum auf. Darauf bezogen lässt sich außerdem feststellen, dass das empirische Minimum hinsichtlich aller Nutzungsindikatoren Null beträgt. Mindestens ein Schüler oder eine Schülerin hat demnach kein Feedback in Anspruch genommen. Durchschnittlich nutzten die Lernenden die angebotenen Hilfen rund 1.14 Minuten, wobei die Hilfe „Nachschlagen“ als eine der komplexesten Hilfen im Mittel am längsten betrachtet wurde ($M = 24.49$ s) und die Definitionen am kürzesten ($M = 12.51$ s). Im Vergleich zur Dauer der Hilfenutzung zeichnet sich für die Häufigkeit der Hilfenutzung ein ähnliches Bild. Die Lernenden nutzten im Schnitt die Hilfe „Lösung zeigen“ am häufigsten, welche sie rund 21 Sekunden betrachteten. Die Hilfe „Definitionen“ wurde im Mittel ca. ein einzelnes Mal beim Bearbeiten aller Aufgaben genutzt.

Zusätzlich zu der Feedbacknutzung wurde die „Polung des Feedbacks“, also ob das Feedback positiv oder negativ ausgefallen ist, für EG 2 erfasst. Ob Lernenden mit positivem oder negativem Feedback konfrontiert werden, kann durchaus Einfluss auf den Effekt von Feedback auf die Motivation und Emotionen von Lernenden haben (vgl. Abschnitt B, Kapitel 3.5). Die deskriptiven Ergebnisse zu der Polung des Feedbacks (positives vs. negatives Feedback) zeigen, dass die Lernenden der EG 2 positives Feedback durchweg unmittelbar übersprangen. Durch die hohe Standardabweichung wird deutlich, dass die Zeit, die sie auf negativem Feedback verbrachten, stark variiert.

Tabelle 22: Deskriptive Werte der Feedbacknutzung sowie der Feedbackpolung (pos. vs. neg.) EG 2

	Min	Max	M	SD
Dauer (in Sek)				
NutzDauGes	0	344	73.90	90.29
NutzDauDef	0	243	12.51	38.44
NutzDauTip	0	90	15.85	21.04
NutzDauNsc	0	216	24.49	48.86
NutzDauLös	0	130	21.04	28.14
Häufigkeit				
NutzHäufGes	0	60	12.91	13.81
NutzHäufDef	0	8	.99	2.11
NutzHäufTip	0	8	2.21	2.27
NutzHäufNsc	0	10	1.64	1.97
NutzHäufLös	0	13	2.91	3.32
Feedbackpolung				
HäufFbPos	6	19	13.85	3.69
HäufFbNeg	0	18	6.65	4.45

NutzDauGes = Feedbacknutzungsdauer gesamt, NutzDauDef = Feedbacknutzungsdauer der Hilfe „Definition“, NutzDauTip = Feedbacknutzungsdauer der Hilfe „Tipp“, NutzDauNsc = Feedbacknutzungsdauer der Hilfe „Nachschlagen“, NutzDauLös = Feedbacknutzungsdauer der Hilfe „Lösung“, NutzHäufGes = Feedbacknutzungshäufigkeit gesamt, NutzHäufDef = Feedbacknutzungshäufigkeit der Hilfe „Definition“, NutzHäufTip = Feedbacknutzungshäufigkeit der Hilfe „Tipp“, NutzHäufNsc = Feedbacknutzungshäufigkeit der Hilfe „Nachschlagen“, NutzHäufLös = Feedbacknutzungshäufigkeit der Hilfe „Lösung“, HäufFbPos = Häufigkeit positiven Feedbacks, HäufFbNeg = Häufigkeit negativen Feedbacks

3 Einflüsse auf die Feedbackwahrnehmung sowie Feedbacknutzung

Forschungsfrage 2: (Inwiefern) Haben Lernenden- und Feedbackigenschaften einen Einfluss auf die Feedbackwahrnehmung sowie Feedbacknutzung der Lernenden?

Um besser verstehen zu können, welche Faktoren die Feedbackwahrnehmung sowie die Feedbacknutzung beeinflussen und damit potenziell Schülereigenschaften kennenzulernen, die die Wahrnehmung und Nutzung von Feedback positiv, bzw. negativ beeinflussen (können), werden **Pfadanalysen** mit potenziellen Einflussvariablen auf die Feedbackwahrnehmung und -nutzung als abhängige Variablen berechnet. Hinsichtlich der Erklärung der Feedbackwahrnehmung werden hierarchische **Moderationsanalysen** durchgeführt und berichtet. Die Moderationsanalysen untersuchen potenzielle Interaktionen zwischen der Feedbackgruppe und den unabhängigen Variablen. Die Untersuchung der Feedbacknutzung erfolgt aufgrund unterschiedlicher Operationalisierung getrennt nach den EG. Da es sich bei der Feedbacknutzung der EG 1 um eine dichotom kodierte Variable (0 = zweiter Versuch nicht genutzt, 1 = zweiter Versuch genutzt) handelt, erfolgt die Analyse hinsichtlich der Einflussvariablen mit **binär logistischen Regressionsanalysen**. Hinsichtlich EG 2 werden **multiple Regressionsanalysen**²¹ durchgeführt und berichtet.

²¹ Die Autorin ist sich dem Problem der Multikollinearität bei der Durchführung multipler Regressionen durchaus bewusst. Korrelationsanalysen können erste Hinweise auf zu hohe Korrelationen der Prädiktoren liefern. Unter

Bei den unabhängigen Variablen handelt es sich um Leistungsparameter (Bruchrechenleistung Mzp 1, allgemeine kognitive Fähigkeiten, Lesefähigkeiten), Skalen bezogen auf digitale Medien (Einstellungen gegenüber digitalen Medien, digitale Medienkompetenz, Interesse an digitalen Medien) sowie Skalen bezogen auf motivational-emotionale Variablen (Selbstwirksamkeitserwartung bezogen auf Mathematik, Motivation bezogen auf Mathematik, Interesse an Mathematik, Selbstkonzept bezogen auf Mathematik, Mathematikangst)²² sowie Indikatoren für die Feedbackpolung²³. Diese Variablen wurden alle bereits in theoretischen sowie empirischen Abhandlungen als Einflussvariablen der Feedbackwahrnehmung diskutiert.

Bevor die Analysen allerdings durchgeführt werden, wurden die Variablen auf die notwendigen Voraussetzungen geprüft. Die Bruchrechenleistung (Mzp 1) wurde bereits als nicht normalverteilt herausgestellt (vgl. Anhang 7). Aufgrund dieser Verletzung der Voraussetzung wird ein bias-corrected Bootstrap-Verfahren bei der Berechnung der Pfadanalysen angewendet. Alle weiteren Variablen erweisen sich als statthaft in Bezug auf die Voraussetzungen²⁴.

3.1 Erklärung der Feedbackwahrnehmung

Um zu klären, wie viel Varianz der Feedbackwahrnehmung durch die herangezogenen Variablen aufgeklärt wird, erfolgen hierarchische Moderationsanalysen, deren Modelle nachfolgend in Tabelle 23 und Tabelle 24 berichtet werden. Vorangegangene Korrelationsanalysen, bei denen den Konventionen nach Cohen (1988) folgend kleine bis mittlere Zusammenhänge ($.18 < r < .33$) zwischen den Variablen festgestellt werden konnten, sind in Anhang 12 (vgl. Tabelle 53) dargestellt.

„Hierarchisch“ bedeutet, dass vorerst die Analyse der Prädiktoren erfolgt und anschließend Interaktionen in die Modelle aufgenommen und untersucht werden. So wird zunächst untersucht, ob die Bruchrechenleistung (Mzp 1) unter Kontrolle der Feedbackbedingung einen Einfluss auf die Feedbackwahrnehmung hat (Modell 1 & 1.1), um anschließend mögliche Interaktionen zwischen eben diesen beiden Variablen zu analysieren (Modell 2 & 2.2). Anschließend Modelle

Bezugnahme eben dieser Tabellen erscheinen die Korrelationen bezüglich der Multikollinearität als nicht problematisch (vgl. Anhang 12). Auch analysierte VIF-Werte ($1.00 \leq VIF \leq 2.80$) zeigen, dass keine Multikollinearität vorliegt.

²² Die deskriptiven Werte der Skalen bezogen auf digitale Medien (Einstellungen gegenüber digitalen Medien, digitale Medienkompetenz, Interesse an digitalen Medien) sowie der Skalen bezogen auf motivational-emotionale Variablen (Selbstwirksamkeitserwartung bezogen auf Mathematik, Motivation bezogen auf Mathematik, Interesse an Mathematik, Selbstkonzept bezogen auf Mathematik, Mathematikangst) befinden sich in Anhang 11.

²³ Zur Erinnerung: Die Feedbackpolung, operationalisiert über die Häufigkeit positiven und negativen Feedbacks, wurde nur für die EG 2 erhoben und wird daher auch nur in die Modelle der EG 2 als Prädiktor einbezogen.

²⁴ Bei Prüfung der Linearität durch Streudiagramme sind lineare Zusammenhänge zwischen den unabhängigen Variablen und der abhängigen Variable durchaus kritisch zu betrachten. Modelle mit transformierten Daten liefern allerdings keine oder nur geringfügig bessere Ergebnisse, weshalb sich für das Berichten linearer Modelle entschieden wurde.

nehmen weitere potenzielle Einflussvariablen auf. Zwischen diesen Variablen und der Feedbackbedingung werden ebenfalls Interaktionseffekte untersucht (Modell 3 – 4.1).

Die nach diesem Schema aufgestellten und analysierten Modelle erscheinen nicht alle als signifikant und weisen eine hohe Spannweite hinsichtlich der Varianzaufklärung auf. Die signifikanten Modelle klären zwischen 7 % und 17 % der Varianz über die Subskalen der Feedbackwahrnehmung hinweg auf.

Für die wahrgenommene Kompetenzunterstützung, das wahrgenommene Kompetenzerleben als auch die wahrgenommene Nützlichkeit scheinen vor allem die Mathematikangst sowie die Motivation bezogen auf das Fach Mathematik einen Teil der Varianz in der Feedbackwahrnehmung aufzuklären. Hinsichtlich der wahrgenommenen Kompetenzunterstützung und des wahrgenommenen Kompetenzerlebens werden die Regressionskoeffizienten der Interaktionen zwischen der Feedbackgruppe und der Mathematikangst ebenfalls signifikant. Das heißt: Je motivierter die Lernenden, aber auch, je größer die Mathematikangst, desto eher fühlen sich die Lernenden in ihrer Kompetenz unterstützt, erleben mehr Kompetenz durch das Feedback der Lernplattform und nehmen das Feedback als nützlicher wahr.

Hinsichtlich des Einflusses der Bruchrechenleistung (Mzp 1) zeigt sich: Während Modell 3 einen signifikanten Einfluss der Bruchrechenleistung (Mzp 1) auf die wahrgenommene Kompetenzunterstützung zeigt und unter Bezugnahme von Interaktionseffekten die Interaktion zwischen der Bruchrechenleistung und der Feedbackgruppe signifikant erscheint (Modell 4), verschwinden diese beiden Effekte in dem Modell mit der höchsten Varianzaufklärung (16 %) unter Kontrolle weiterer Variablen wie z. B. der Motivation bezogen auf das Fach Mathematik und der Mathematikangst. Außerdem zeigt sich, dass die wahrgenommene Kompetenzunterstützung, das wahrgenommene Kompetenzerleben sowie die wahrgenommene Nützlichkeit vor allem durch motivational-emotionale Variablen erklärt werden. Auf die wahrgenommene Verstehensunterstützung wiederum wirkt vor allem die Bruchrechenleistung (Mzp 1). Das bedeutet konkret: Je besser die Lernenden zu Mzp 1 im Gesamttest sowie hinsichtlich des prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung abschnitten, desto eher fühlen sich die Lernenden in ihrem Verstehen unterstützt.

Tabelle 23: Ergebnisse der Regressionsmodelle mit Interaktionseffekten zur Vorhersage der wahrgenommenen Kompetenzunterstützung und des wahrgenommenen Kompetenzerlebens

	Wahrgenommene Kompetenzunterstützung								Wahrgenommenes Kompetenzerleben							
	M 1	M 1.1	M 2	M 2.2	M 3	M 3.1	M 4	M 4.1	M 1	M 1.1	M 2	M 2.2	M 3	M 3.1	M 4	M 4.1
Gruppe	-.10	-.12	-.10	-.12	-.11	-.11	-.07	-.09	.03	.00	.03	.00	.03	.02	.02	.01
	-.08	-.10	-.08	-.10	-.08	-.09	-.06	-.08	.02	.00	.02	.00	.02	.02	.03	.03
Bruchrechenleistung (Mzp 1)																
LeistGes1	.10		.01		.11		.03		.05		.03		.06		.01	
	.16 ^(*)		.02		.17 [*]		.02		.08		.05		.10		.01	
LeistKonz1		-.05		-.10		.01		-.09		-.08		-.14		-.01		.11
		-.07		-.16		.02		-.10		-.12		-.22		-.01		.08
LeistProz1		.12		.11		.09		.14		.10		.13		.07		-.03
		.19 ^(*)		.12		.14		.12		.15		.20		.10		-.05
Variablen bezogen auf digitale Medien																
DigMedEinst					-.01	-.01	-.08	-.04					-.00	-.00	-.08	-.08
					-.02	-.02	-.09	-.04					-.00	-.00	-.09	-.10
DigMed-Komp					.02	.03	-.09	.28					.06	.06	.31	.33
					.04	.04	-.09	.26					.09	.09	.35 ^(*)	.36 ^(*)
DigMedInt					.11	.11	.19	-.06					-.00	-.01	-.18	-.21
					.18 ^(*)	.18	.17	-.08					-.00	-.01	-.15	-.20
Motivational-emotionale Variablen																
MathMot					.24	.24	.27	.46					.21	.20	.36	.34
					.39 [*]	.38 [*]	.24	.50 [*]					.33 [*]	.32 ^(*)	.33	.30
MathSk					-.15	-.15	-.05	-.10					-.21	-.21	-.26	-.23
					-.24	-.24	-.04	-.09					-.33	-.33 [*]	-.24	-.26
MathAng					.12	.12	.00	.64					.13	.13	.52	.55
					.19 ^(*)	.19	.01	.60 ^{**}					.21 ^(*)	.21 ^(*)	.54 ^{**}	.50 ^{**}
MathSwe					.11	.12	.31	.35					.08	.08	.18	.22
					.18	.19	.29 [*]	.29 ^(*)					.12	.13	.16	.19
MathInt					-.01	-.01	-.37	-.13					.14	.14	.21	.18
					-.02	-.02	-.29 [*]	-.10					.22	.22	.17	.17
Gr*Leist-Ges1			.17				.24				.03				.04	
			.19				.26 [*]				.04				.03	
Gr*Leist-Konz1				.10				.12				.11				.11
				.11				.10				.12				.15

Tabelle 24: Ergebnisse der Regressionsmodelle mit Interaktionseffekten zur Vorhersage der wahrgenommenen Nützlichkeit, der wahrgenommenen Verstehensunterstützung und der wahrgenommenen konstruktiven Unterstützung

	Wahrgenommene Nützlichkeit								Wahrgenommene Verstehensunterstützung								Wahrgenommene konstruktive Unterstützung							
	M 1	M 1.1	M 2	M 2.2	M 3	M 3.1	M 4	M 4.1	M 1	M 1.1	M 2	M 2.2	M 3	M 3.1	M 4	M 4.1	M 1	M 1.1	M 2	M 2.2	M 3	M 3.1	M 4	M 4.1
Gruppe	-.18	-.18	-.18	-.17	-.16	-.15	-.11	-.11	.08	.05	.08	.04	.09	.08	.07	.06	.11	.09	.11	.08	.13	.11	.11	.09
	-.13	-.13	-.13	-.13	-.12	.11	-.12	-.10	.06	.04	.06	.04	.07	.06	.05	.05	.09	.07	.09	.06	.10	.09	.09	.07
Bruchrechenleistung (Mzp 1)																								
LeistGes1	.01		.01		-.00		.03		.09(*)		.15		.10		.26		.06		.01		.06		.05	
	.01		.01		-.01		.02		.15		.24*		.17*		.29*		.09		.02		.09		.05	
LeistKonz1		.00		.06		.04		.12		-.09		-.12		-.04		-.10		-.10		-.15		-.07		-.24
		.01		.09		.06		.10		.15		-.20		-.07		-.10		-.15		-.22		-.10		-.30
LeistProz1		.03		.01		-.00		.04		.15		.21		.12		.32		.13		.12		.11		.28
		.05		.01		-.00		.03		.24*		.34*		.20(*)		.37(*)		.19(*)		.19		.17		.29
Variablen bezogen auf digitale Medien																								
DigMedEinst					.03	.02	-.09	-.10					.02	.03	-.16	-.15					.05	.06	.01	.02
					.04	.03	-.08	-.08					.04	.04	-.14	-.13					.08	.09	.00	.02
DigMed-Komp					.10	.09	.28	.24					.03	.04	.11	.16					.06	.07	.08	.12
					.14	.13	.23	.20					.05	.07	.11	.14					.09		.10	.10
DigMedInt					.07	.08	-.08	-.05					.11	.10	.10	.05					-.02	-.04	-.14	-.20
					.10	.11	-.06	-.04					.18	.16	.10	.06					-.03	-.05	-.17	-.25
Motivational-emotionale Variablen																								
MathMot					.21	.21	.45	.45					.08	.07	.28	.26					.08	.07	.16	.12
					.30(*)	.30*	.43(*)	.43(*)					.13	.11	.29	.26					.13	.10	.18	.13
MathSk					-.08	-.09	.11	.11					-.15	-.15	-.24	-.22					-.15	-.15	-.14	-.09
					-.12	-.13	.10	.11					-.24	-.24	-.26	-.24					-.22	-.23	-.12	-.07
MathAng					.12	.12	.40	.44					.11	.11	.33	.37					.11	.11	.33	.38
					.17	.18	.41*	.45*					.17	.17	.37(*)	.39(*)					.16	.16	.29(*)	.36(*)
MathSwe					.13	.13	.19	.21					.08	.09	.32	.36					.10	.12	.33	.39
					.19	.19	.19	.21					.13	.15	.30	.33(*)					.15	.18	.30	.34(*)
MathInt					-.01	.00	-.24	-.21					.14	.14	.19	.16					.14	.13	.06	-.01
					-.01	.00	-.23	-.22					.23	.22	.18	.14					.21	.19	.04	-.01
Gr*Leist-Ges1			.00				.02						-.11		-.07				.09				.15	
			.00				.01						-.13		-.07				.10				.17	
Gr*Leist-Konz1				-.10				-.09				.05				.05			.08				.18	
				-.10				-.09				.06				.04			.10				.20	
Gr*Leist-Proz1				.04				.03				-.11				-.09			.02				-.01	
				.04				.03				-.13				-.08			.02				-.01	
Gr*DigMedEinst						.14	.15								.23	.22							.11	.09
						.13	.13								.22	.21							.10	.07
Gr* Dig-MedKomp						-.13	-.10								-.06	-.08							.05	.03
						-.10	-.09								-.05	-.06							.05	.02

Grafische Darstellung der Interaktionen zwischen der Feedbackbedingung und potenziellen die Wahrnehmung von Feedback erklärenden Variablen:

Bezüglich der in Tabelle 23 und Tabelle 24 dargestellten signifikanten Interaktionseffekten sollen vertiefende grafischen Darstellungen in Form von simple slopes vorgenommen werden. So zeigt sich beispielsweise ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen der Feedbackgruppe und der Bruchrechenleistung (Mzp 1). Bezüglich dieses Effekts wird durch Abbildung 34 veranschaulicht, dass die wahrgenommene Kompetenzunterstützung für die EG 1 („KR“) bei veränderter Bruchrechenleistung (Mzp 1) auf einem gleichen Niveau bleibt. Für die EG 2 („elabo“) wiederum zeigt sich mit steigender Bruchrechenleistung (Mzp 1) eine positivere Wahrnehmung der Kompetenzunterstützung. Anders verhält es sich hinsichtlich der Interaktion zwischen der Feedbackgruppe und der Mathematikangst. Während die wahrgenommene Kompetenzunterstützung mit ausgeprägterer Mathematikangst für EG 2 nur leicht steigt, zeigt sich für EG 1 eine deutliche Erhöhung der wahrgenommenen Kompetenzunterstützung durch das Feedback der Lernplattform (vgl. Abbildung 35). Ähnlich verhält sich der Einfluss der Interaktion zwischen der Feedbackgruppe und der Mathematikangst auf das wahrgenommene Kompetenzerleben, wobei der Anstieg des Kompetenzerlebens für EG 1 nicht so stark erscheint wie der Anstieg der Kompetenzunterstützung (vgl. Abbildung 36).

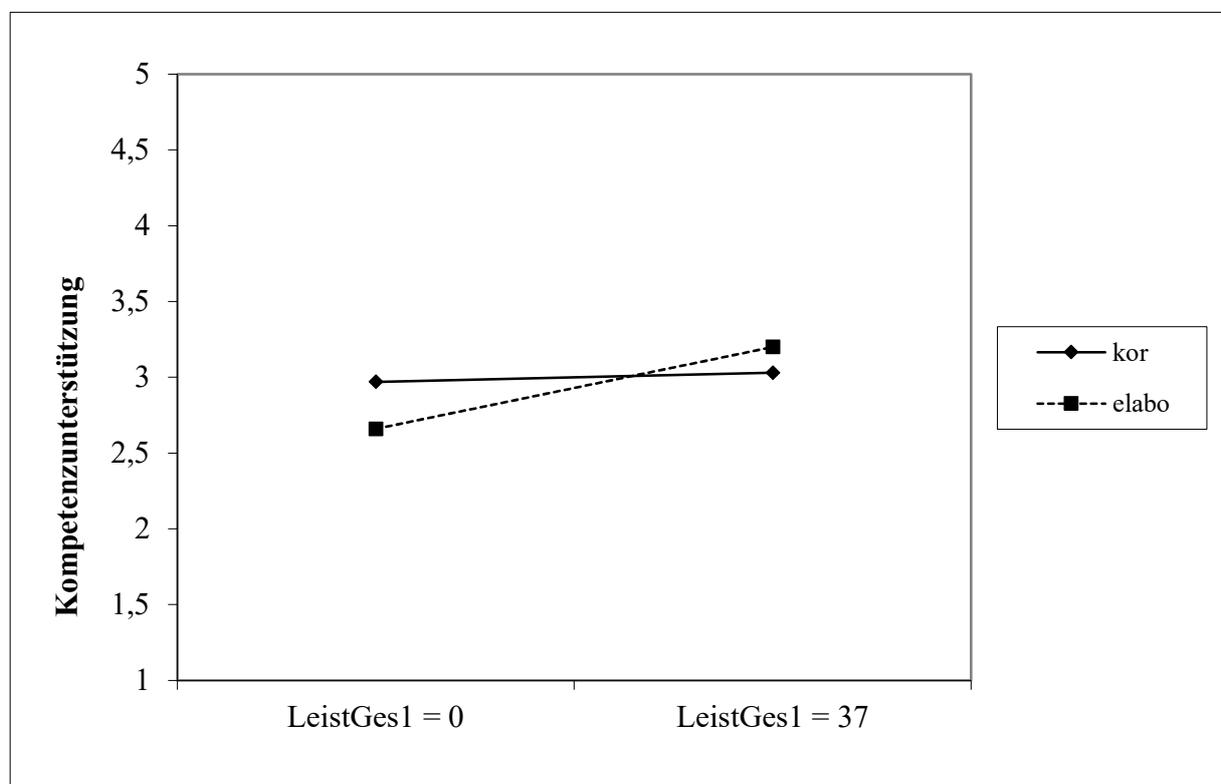


Abbildung 34: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen der Bruchrechenleistung (= LeistGes1) und der wahrgenommenen Kompetenzunterstützung

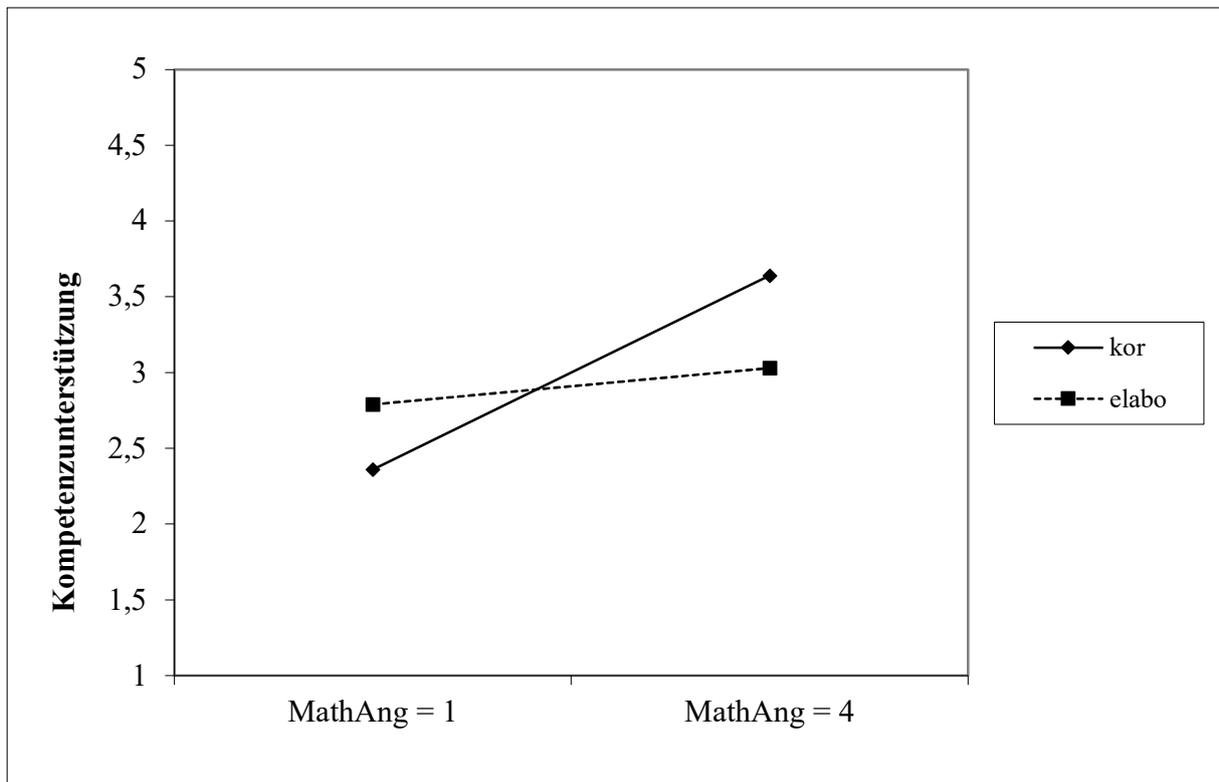


Abbildung 35: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen der Mathematikangst (= MathAng) und der wahrgenommenen Kompetenzunterstützung

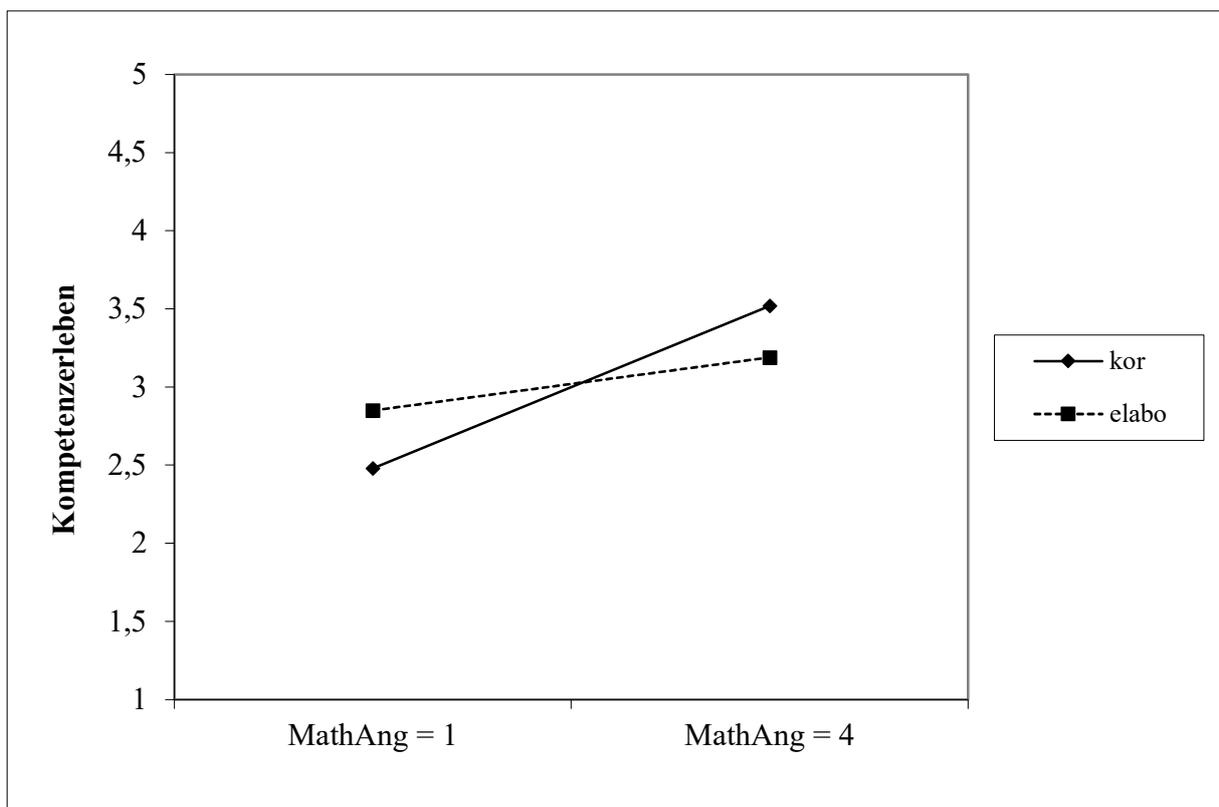


Abbildung 36: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen der Mathematikangst (= MathAng) und des wahrgenommenen Kompetenzerlebens

Da für die EG 2 weitere potenzielle Prädiktoren der Feedbackwahrnehmung erfasst wurden, werden weitere Analysen hinsichtlich der Erklärung der Wahrnehmung elaborierten Feedbacks vorgenommen. So wurde für die EG 2 erfasst, wie häufig die Lernenden im Laufe der Bearbeitung der Bruchrechenaufgaben positives oder negatives Feedback erhielten. Wie Tabelle 25 zeigt, fühlen sich die Lernenden in ihrer Kompetenz mehr unterstützt und berichten ein positiveres Kompetenzerleben, je häufiger sie positives Feedback erhalten. Auf die Wahrnehmung der Nützlichkeit, der Kompetenzunterstützung sowie der konstruktiven Unterstützung des Feedbacks scheint die Feedbackpolung keinen signifikanten Einfluss zu haben.

Tabelle 25: Ergebnisse der Regressionsmodelle zur Vorhersage der Feedbackwahrnehmung für EG 2

	Wahrgenommene Kompetenzunterstützung		Wahrgenommenes Kompetenzerleben		Wahrgenommene Nützlichkeit		Wahrgenommene Verstehensunterstützung		Wahrgenommene konstruktive Unterstützung	
	M 1	M 1.1	M 1	M 1.1	M 1	M 1.1	M 1	M 1.1	M 1	M 1.1
Bruchrechenleistung (Mzp 1)										
LeistGes1	.10		.09		.16		.26		.30	
	.16		.15		.21		.40		.42	
LeistKonz1		.03		.03		.11		.11		.12
		.04		.05		.16		.18		.18
LeistProz1		.08		.06		.09		.16		.20
		.13		.09		.12		.24		.28
Variablen bezogen auf digitale Medien										
DigMedEinst	-.01	-.02	.09	.09	.12	.10	.08	.06	.09	.07
	-.02	-.03	.15	.14	.16	.13	.12	.09	.13	.10
DigMed-Komp	-.00	-.00	.06	.06	.08	.07	.06	.05	.13	.13
DigMedInt	-.01	-.00	.10	.10	.11	.11	.09	.09	.19	.19
	.20	.20	.02	.03	.21	.24	.16	.19	.06	.09
	.31(*)	.31(*)	.04	.05	.29	.32	.24	.28	.09	.12
Motivational-emotionale Variablen										
MathMot	.28	.27	.25	.25	.22	.23	.05	.07	.10	.11
	.47(*)	.47	.42	.43	.31	.34	.09	.11	.15	.17
MathSk	-.39	-.39	-.25	-.25	-.29	-.30	-.19	-.19	-.38	-.38
	-.60*	-.60*	-.38	-.38	.38	-.39	-.28	-.28	-.52(*)	-.52*
MathAng	-.09	-.09	-.04	-.04	-.01	-.02	.02	.02	-.08	-.08
	-.13	-.14	-.05	-.06	-.02	-.02	.04	.03	-.11	-.12
MathSwe	.02	.01	-.03	-.04	.24	.21	.05	.01	-.02	-.06
	.03	.01	-.05	-.06	.30	.26	.06	.02	-.03	-.08
MathInt	.14	.16	.15	.15		.09	.14	.17	.32	.35
	.25	.27	.25	.27		.13	.24	.29	.51	.55(*)
Feedbackpolung										
HäufFbPos	.28	.29	.25	.26	-.14	-.14	-.19	-.16	-.04	-.02
	.35*	.43*	.38*	.40*	-.18	-.18	-.28	-.24	-.06	-.03
HäufFbNeg	.05	.05	.26	.26	.13	.14	.08	.08	.10	.10
	.04	.08	.40	.39	.17	.18	.12	.11	.14	.14
Signifikanz	< .05	< .05	< .01	< .01	.10	.13	.22	.33	.09	.14
R ² _{korr}	.23	.21	.31	.29	.14	.13	.08	.04	.15	.12

Dargestellt sind die unstandardisierten (B) sowie standardisierten (β) Regressionskoeffizienten; R² = aufgeklärte Varianz; (*) < .10 * p < .05, ** < .01, *** < .001, die Analysen wurden mit z-standardisierten Werten durchgeführt

3.2 Erklärung der Feedbacknutzung

Für eine effektive Gestaltung von Feedback muss dieses an die individuellen Bedürfnisse der Lernenden angepasst sein. Um die Bedürfnisse verstehen zu können, sind Erkenntnisse darüber, welche Feedbackart von welchen Lernenden genutzt wird, notwendig. Neben der Analyse möglicher Einflussfaktoren auf die Feedbackwahrnehmung, soll daher ein Beitrag zur Erklärung der Feedbacknutzung von Lernenden geliefert werden. Dabei werden analog zur Feedbackwahrnehmung die Bruchrechenleistung (Mzp 1), Variablen bezogen auf digitale Medien und motivational-emotionale Variablen sowie für EG 2 die Feedbackpolung (positives vs. negatives Feedback) aufgrund theoretisch und empirisch diskutierter Forschungsergebnisse herangezogen. Da Studienergebnisse den Zusammenhang der Wahrnehmung und Nutzung von Feedback nahelegen, werden die Analysen um die Subskalen der Feedbackwahrnehmung als potenzielle Prädiktoren ergänzt. Zur Erinnerung: Die abhängige Variable der Feedbacknutzung wurde für EG 1 über die Nutzung eines zweiten Versuchs nach Erhalt des zusammenfassenden KR Feedbacks operationalisiert. Die Operationalisierung der Feedbacknutzung von EG 2 erfolgte über die Erfassung der Dauer und Häufigkeit des Anzeigens der einzelnen durch die Lernplattform angebotenen Hilfen. Die korrelativen Zusammenhänge der unabhängigen und abhängigen Variablen sind in Anhang 12 (Tabelle 54-57) dargestellt.

Die für die EG 1 durchgeführten multiplen binär logistischen Regressionen bringen keine signifikanten Modelle hervor (vgl. Anhang 13).

Die Ergebnisse der multiplen Regressionen für EG 2 zur Erklärung der Feedbacknutzung sind in Tabelle 26 dargestellt. Zu den Modellen sollten vorab ein paar Anmerkungen getroffen werden: (1) In Kapitel 2 dieses Abschnitts wurden zwar die deskriptiven Werte aller einzelnen Hilfen (Definition, Tipp, Nachschlagen, Lösung) berichtet, an dieser Stelle sollen zur Schaffung einer besseren Übersichtlichkeit jedoch lediglich signifikante Modelle dargestellt und genauer betrachtet werden. Aufgrund dessen sind ausschließlich die Gesamtdauer und -häufigkeit der Feedbacknutzung sowie die Dauer und Häufigkeit, die die Hilfe „Lösung anzeigen“ genutzt wurde, als unabhängige Variablen dargestellt. (2) In einem ersten Modell wird zunächst die Bruchrechenleistung (Mzp 1) der Lernenden als einzelner potenzieller Prädiktor berichtet, um anschließend die Varianzaufklärung der Bruchrechenleistung (Mzp 1) unter Bezugnahme weiterer Variablen zu kontrollieren. (3) Für die Häufigkeit der Nutzung der Hilfe „Lösung anzeigen“ wurde ein zusätzliches Modell mit den Einflussvariablen ohne die Feedbackpolung (pos. vs. neg.) berechnet, da sich die Feedbackpolung und die Häufigkeit der Nutzung der Option

„Lösung anzeigen“ wechselseitig beeinflussen, denn: Je häufiger sich Lernende die Lösung anzeigen lassen, desto seltener erhalten eben jene Lernende positives Feedback. Lernende wiederum, die häufig positives Feedback erhalten, haben sich kaum die Lösung anzeigen lassen. Gleiche Überlegungen wurden ebenfalls für die Dauer, die die Lösung betrachtet wurde, angestellt. Allerdings lieferte das Modell ohne die Feedbackpolung keine signifikante Erklärung der Feedbacknutzung.

Die Analyseergebnisse zeigen, dass die Bruchrechenleistung (Mzp 1) in einem negativen Zusammenhang mit der Feedbacknutzung steht. Es gilt demnach, dass Lernende, die über ein geringeres Vorwissen verfügen, die Hilfen und ganz im Speziellen die Lösung länger und häufiger nutzen. Ausnahme bildet die Gesamtdauer der Feedbacknutzung, die nicht von der Bruchrechenleistung (Mzp 1) beeinflusst wird. Stattdessen zeigen sich signifikante Regressionskoeffizienten für den Einfluss der Einstellungen gegenüber digitalen Medien auf die Gesamtdauer der Feedbacknutzung. Je positiver die Lernenden digitalen Medien gegenüber eingestellt sind, desto länger nutzen die Lernenden das Feedback. Ansonsten scheinen Variablen bezogen auf digitale Medien in keinem signifikanten Zusammenhang mit der Feedbacknutzung zu stehen und auch hinsichtlich der motivational-emotionalen Variablen zeigt sich lediglich für die Selbstwirksamkeitserwartung ein signifikanter Einfluss auf die Häufigkeit der Nutzung der Hilfe „Lösung anzeigen“. Dieser Effekt verschwindet allerdings unter Kontrolle der Feedbackpolung (pos. vs. neg.). Der Erhalt negativen Feedbacks beeinflusst vor allem die Häufigkeit, mit der das Feedback genutzt wird. Je häufiger die Lernenden negatives Feedback erhalten, desto häufiger nutzen diese auch das Feedback.

Tabelle 26: Ergebnisse der Regressionsmodelle zur Vorhersage der Feedbacknutzung von EG 2 durch die Bruchrechenleistung (Mzp 1), Variablen bezogen auf digitale Medien, emotional-motivationale Variablen, die Feedbackwahrnehmung und die Feedbackpolung (pos. vs. neg.)

	NutzDauGes			NutzHäufGes			NutzDauLös			NutzHäufLös					
	M 1	M 2	M 2.2	M 1	M 2	M 2.2	M 1	M 2	M 2.2	M 1	M 1.1	M 2	M 2.2	M 3	M 3.1
Bruchrechenleistung (Mzp 1)															
LeistGes1	-20.84	-12.05		-4.70	-1.95		-9.44	-3.93		-1.37		-.84		-.38	
	-.24 ^(*)	-.14		-.35 ^{**}	-.15		-.35 ^{**}	-.14		-.43 ^{***}		-.26 [*]		-.83	
LeistKonz1			-1.90			-.58			-.16		-.62		-.34		.01
			-.02			-.05			-.01		-.20		-.11		.00
LeistProz1			1.31			-.51			-2.14		-.96		-.65		-.33
			.01			-.04			-.07		-.30 [*]		-.20		-.10
Variablen bezogen auf digitale Medien															
DigMedEinst		43.55	44.60		3.32	3.49		7.82	8.09			-.24	-.21	-.38	-.36
		.49 [*]	.50 ^{**}		.25	.26		.28	.29 ^(*)			-.07	-.07	-.12	-.11
DigMed-Komp		2.96	5.33		.77	.10		5.52	5.76			-.11	-.13	.03	.03
		.04	.06		.06	.08		.21	.22			-.04	-.04	.01	.01
DigMedInt		6.86	4.95		-.31	-.56		1.23	1.02			-.03	-.01	.33	.33
		.08	.06		-.02	-.04		.04	.04			.01	-.00	.10	.10
Motivational-emotionale Variablen															
MathMot		35.87	33.13		3.65	3.37		10.57	10.47			.93	.93	.87	.90
		.44	.41		.30	.28		.41	.41			.31	.31	.30	.31
MathSk		13.66	12.40		-.04	-.13		8.14	7.91			-.28	-.27	.32	.31
		.15	.14		-.00	-.10		.28	.27			-.08	-.08	.10	.09
MathAng		-2.69	-2.92		1.57	1.58		-7.85	-7.82			-.74	-.71	-.48	-.48
		-.03	-.14		.12	.12		-.27 [*]	-.27 ^(*)			-.22	-.21	-.15	-.15
MathSwe		5.89	5.89		1.69	1.73		-8.01	-7.93			-1.39	-1.32	-1.02	-1.00
		.04	.05		.12	.12		-.27	-.27			-.42 [*]	-.211 [*]	-.30 ^(*)	-.29 ^(*)
MathInt		-11.94	-10.41		.42	.46		-7.77	-7.78			.54	.45	.15	.13
		-.15	-.13		.04	.04		-.31	-.31			.18	.15	.05	.05
Feedbackwahrnehmung															
WKompUnt		41.51 ^(*)	44.22 ^(*)		1.07	1.30		10.18	10.74			-1.37	-1.39	-.38	-.34
		.48	.51		.08	.10		.37	.39			-.42 [*]	-.43 [*]	-.12	-.11
WKompErl		-3.09	-3.81		1.10	1.01		2.83	2.63			-.91	-.91	.06	.04
		-.04	-.04		.08	.08		.10	.09			-.27 ^(*)	-.27 ^(*)	.02	.01
WNützlich		-16.33	-16.14		-.37	-.31		-6.16	-6.16			1.12	1.17	.55	.55
		-.20	-.19		-.03	-.03		-.24	-.24			.36 [*]	.38 [*]	.18	.18
WVerstUnt		14.14	14.14		2.44	2.30		11.42	11.15			.61	.58	.29	.27
		.17	.17		.20	.18		.43 [*]	.42 ^(*)			.19	.18	.09	.09

WKonstUnt	-18.10	-21.28	-2.61	-2.87	-12.57	-13.06	-27	-26	-78	-80		
	-.22	-.26	-.21	-.23	-.48 ^(*)	-.50 ^(*)	-.09	-.08	-.26	-.27		
Feedbackpolung												
HäufFbPos	-30.55	-36.56	-2.63	-3.19	-	-13.47			-2.22	-2.29		
	-.33	-.40	-.19	-.23	12.37 ^(*)	-.46 [*]			-.66 ^{***}	-.68 ^{***}		
HäufFbNeg	28.96	33.52	5.59	5.96	8.21	9.00			-.75	-.70		
	.31	.36	.41 [*]	.43 [*]	.28	.31			-.22	-.21		
Signifikanz	.05	< .01	< .05	.01	< .01	< .05	< .05	< .01	< .001	< .001	< .001	< .001
R ² _{korr}	.04	.34	.31	.33	.11	.30	.27	.16	.36	.35	.62	.60

Dargestellt sind die unstandardisierten (B) sowie standardisierten (β) Regressionskoeffizienten; R² = aufgeklärte Varianz; ^(*) < .10 * p < .05, ** < .01, *** < .001, die Analysen wurden mit z-standardisierten Werten durchgeführt

4 Feedbackwahrnehmung und -nutzung als Einflussfaktoren auf den Lernerfolg

Nachdem zumindest in Teilen aufgeklärt werden konnte, welche Eigenschaften der Lernenden zu einer veränderten Feedbackwahrnehmung führen sowie das Nutzungsverhalten beeinflussen, soll nun die Rolle der Wahrnehmung und Nutzung von Feedback in Bezug zum Lernerfolg, also der Förderung der Bruchrechenleistung sowie der Motivationsförderung und dem Aufbau positiver und der Reduktion negativer Emotionen geklärt werden. Dazu wird untersucht, ob und inwiefern die Feedbackwahrnehmung den Effekt von der Feedbackgruppenzugehörigkeit auf die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen mediiert. Dazu werden **Mediationsmodelle** mit der Feedbackgruppenzugehörigkeit als unabhängige Variable, den unterschiedlichen Wahrnehmungsskalen als Mediatorvariablen und der Bruchrechenleistung sowie der Motivation und Emotionen als abhängige Variablen durchgeführt. Darüber hinaus werden unter Durchführung von hierarchischen **Moderationsmodellen** die direkten Effekte der Feedbackwahrnehmung unter Kontrolle weiterer Variablen auf die Bruchrechenleistung (Mzp 2) sowie auf die Motivation und Emotionen untersucht. Da die Feedbacknutzung der beiden EG unterschiedlich operationalisiert wurden, wird die Feedbacknutzung nicht als Mediator behandelt, sondern **multiple lineare Regressionen** mit den Feedbacknutzungsindikatoren als unabhängige Variablen und der Bruchrechenleistung (Mzp 2) sowie der Motivation und Emotionen als abhängige Variablen berechnet. Die korrelativen Zusammenhänge aller in diesem Kapitel behandelten Variablen sind in Anhang 12 dargestellt.

Mit Ausnahme der Bruchrechenleistung (Mzp 2) wurden alle in diesem Kapitel relevanten Variablen bereits auf die notwendigen Voraussetzungen überprüft (vgl. Kapitel 2 diesen Abschnitts). Die Variablen erwiesen sich als statthaft in Bezug auf die Voraussetzungen²⁵. Allerdings verhält sich die Bruchrechenleistung (Mzp 2) nicht normalverteilt (vgl. Anhang 9). Aufgrund dieser Verletzung der Voraussetzung der Normalverteilung wird ein bias-corrected Bootstrap-Verfahren bei der Berechnung der Analysen angewendet.

²⁵ Bei Prüfung der Linearität durch Streudiagramme sind lineare Zusammenhänge zwischen den Feedbackwahrnehmungsvariablen und der Bruchrechenleistung (Mzp 2) durchaus kritisch zu betrachten. Modelle mit transformierten Daten liefern allerdings keine oder nur geringfügig bessere Ergebnisse, weshalb sich für das Berichten linearer Modelle entschieden wurde.

4.1 Feedbackwahrnehmung als Mediator

Forschungsfrage 3: Mediiert die Feedbackwahrnehmung den Effekt von Feedback auf die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen?

4.1.1 Einfluss der Feedbackwahrnehmung auf die Bruchrechenleistung

Ein Mediationsmodell, welches die fünf Subskalen der Feedbackwahrnehmung simultan als Mediatoren einschließt, weist einen schlechten Modellfit auf ($\chi^2 = 313.20$, $p < .01$; CFI = 0.00, TLI = -1.15; RMSEA = .56, SRMR = .35). Mediationsmodelle, die jeweils nur eine Subskala der Feedbackwahrnehmung einbeziehen, weisen wiederum gute Modellfits auf. Allerdings zeigt sich lediglich für die wahrgenommene Kompetenzunterstützung ein direkter Effekt auf die Bruchrechenleistung (Mzp 2) sowohl für das Gesamtergebnis ($\beta = 2.69$, KI [0.39; 4.99]; $R^2 = .03$), als auch für das konzeptuelle ($\beta = 1.08$, KI [0.16; 2.20]; $R^2 = .03$) und prozedurale Wissen zur Bruchrechnung ($\beta = 1.61$, KI [0.28; 2.97]; $R^2 = .04$), jedoch keinen direkten und indirekten Effekt der Feedbackbedingung auf die Bruchrechenleistung (Mzp 2).

Da die Mediationsmodelle eindeutige Hinweise der Wirkung der Feedbackwahrnehmung auf die Bruchrechenleistung liefern, soll in einem zweiten Schritt unter Bezugnahme von hierarchischen Moderationsanalysen geklärt werden, ob diese Wirkung unter Kontrolle weitere Variablen bestehen bleibt. Darüber hinaus werden die Feedbackgruppenzugehörigkeit, die Wahrnehmungsvariablen sowie weitere Variablen auf signifikante Interaktionen überprüft (vgl. Tabelle 27).

Anders als die Mediationsmodelle zeigen die Moderationsanalysen keinen direkten Effekt der Feedbackwahrnehmung auf das Gesamtergebnis der Bruchrechenleistung (Mzp 2). Allerdings wirkt das wahrgenommene Kompetenzerleben auf das konzeptuelle Wissen zur Bruchrechnung und die wahrgenommene konstruktive Unterstützung auf das prozedurale Wissen zur Bruchrechnung. Das bedeutet: Je mehr die Lernenden durch das Feedback Kompetenz erleben, desto besser bearbeiten sie die Testitems zum konzeptuellen Wissen und je mehr sich die Lernenden konstruktiv unterstützt fühlen, desto höher fällt ihr prozedurales Wissen zur Bruchrechnung aus.

Neben den zwei Subskalen der Feedbackwahrnehmung erklärt vor allem die Bruchrechenleistung (Mzp 1) über alle Modelle hinweg die Bruchrechenleistung (Mzp 2), wobei das konzeptuelle und prozedurale Wissen zur Bruchrechnung einen höheren Anteil zur Varianzaufklärung liefern als das Gesamtergebnis des ersten Mzp. Für die Variablen bezogen auf digitale Medien sowie die motivational-emotionalen Variablen ergeben sich keine signifikanten Regressionskoeffizienten.

Tabelle 27: Ergebnisse der Regressionsmodelle mit Interaktionseffekten zur Vorhersage der Bruchrechenleistung (Mzp 2)

	Ges2				Konzeptuelles Wissen 2										Prozedurales Wissen 2														
	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	
	1	2	2.1	3	3.1	4	4.1	5	5.1	1	2	2.1	3	3.1	4	4.1	5	5.1	1	2	2.1	3	3.1	4	4.1	5	5.1		
Gruppe	-.72	-.49	-.88	-.57	-.91	-.53	-1.06	-.59	-1.62	-.23	-.12	-.46	-.17	.12	-.25	-.62	-.30	-.26	-.48	-.37	-.43	-.40	-1.02	-.28	-.44	-.29	-1.36		
	-.04	-.03	-.05	-.03	-.05	-.03	-.06	-.03	-.09	-.03	-.01	-.06	-.02	.01	-.03	-.08	-.04	-.03	-.05	-.04	-.04	-.04	-1.10	-.03	-.04	-.03	-.13		
Feedbackwahrnehmung																													
WKom-	.94	1.56	.54	2.01	-.08	1.37	.32	1.14	-.39	1.38	.95	.43	1.59	.09	.72	.23	1.05	-.11	.17	.61	.12	.42	-.17	.65	.09	.09	-.28		
pUnt	.17	.17	.06	.23	-.01	.15	.04	.13	-.04	.34	.23	.10	.39	.02	.18	.06	.26	-.03	.03	.12	.02	.08	-.03	.12	.02	.02	-.05		
WKom-	-1.99	-2.08	-.56	-3.12	-.86	-2.34	-.55	-2.83	-.59	2.03	1.28	.51	2.09	.81	1.24	.41	1.89	.79	-.96	-.80	-.05	-1.03	-.06	-1.09	-.14	-.92	.20		
pErl	-.22	-	-.06	-.35	-.10	-.26 ^(*)	-.06	-.32	-.07	.49	.31*	.13	.51*	.20	.30*	.10	.46*	.19	-.18	-.15	-.01	-.20	-.01	-.21	-.03	-.17	.04		
WNützlich	-.14	-.87	-.09	-.30	-.11	-1.30	-.21	-.83	-.08	.01	-.40	-.15	-.00	.10	-.53	-.15	-.24	.07	-.28	-.47	.06	-.30	-.22	-.77	-.06	-.60	-.15		
	-.02	-.10	-.01	-.03	-.01	-.15	-.02	-.09	-.01	.00	-.10	-.04	.00	.03	-.13	-.04	-.06	.02	-.05	-.09	.01	-.06	-.04	-.14	-.01	-.11	-.03		
WVerstUnt	1.27	.25	-.32	.93	.77	-.04	-.35	.90	1.17	.70	.21	-.09	.30	.30	.07	-.10	.28	.48	1.10	.04	-.23	.62	.47	-.11	-.26	.62	.69		
	.14	.03	-.04	.10	.09	-.01	-.04	.10	.13	.17	.05	-.02	.07	.30	.02	-.02	.07	.12	.21	.01	-.04	.12	.09	-.02	-.05	.12	.13		
WKonstUnt	2.19	1.21	-.20	1.18	-.69	1.42	-.06	1.45	-.83	.60	.69	.19	.75	.18	.88	.30	1.01	.22	.24	.52	.39	.43	.87	.54	.37	.44	1.05		
t	.24	.14	-.02	.13	-.08	.16	-.01	.16	-.09	.15	.17	.05	.18	.04	.21	.07	.25	.05	.05	.01	.07	.08	.16 ^(*)	.10	.07	.08	.20*		
Bruchrechenleistung (Mzp 1)																													
LeistGes1		1.95		1.68		1.83		1.89		1.95		.80		.76		.80		.87		1.15		.92		1.03		1.02			
		.22*		.19		.20*		.21		.19*		.19		.20*		.21		.21		.27*		.17		.20*		.19			
Leist-			4.04		5.28		4.06		4.96		2.52		3.42		2.48		3.30		1.52		1.86		1.58		1.61		1.61		
Konzl			.45***		.60***		.45***		.54***		.61***		.83***		.60***		.80***		.29***		.35***		.30***		.29**		.29**		
LeistProz1			4.43		2.96		4.37		3.35		.94		.09		1.02		.33		3.49		2.87		3.36		3.02		3.02		
			.49***		.33**		.49***		.37**		.23**		.02		.25**		.08		.66***		.54***		.63***		.57***		.57***		
Variablen bezogen auf digitale Medien																													
DigMed-						.93		-.07		1.23		.53			.11		-.24		-.07		-.20				.82		.13	1.16	.73
dEinst						.10		-.01		.14		.06			.03		-.06		-.02		-.05				.15		.03	.22	.14
DigMed-						-.62		-.14		-1.25		-.28			-.09		.02		.15		.40				-.53		-.25	-1.09	-.67
Komp						-.07		-.02		-.14		-.03			-.02		.01		.04		.10				-.10		-.05	-.21	-.13
DigMedInt						1.13		.39		1.14		-.35			.70		.26		.75		-.03				.43		.11	.40	.38
						.13		.04		.13		-.04			.17		.06		.18		-.01				.08		.02	.08	.07
Motivational-emotionale Variablen																													
MathMot						1.33		.94		3.29		.15			.67		.49		1.73		.12			.94		.27	1.55	-.27	
						.15		.11		.37		.02			.16		.12		.42		.03			.18		.05	.29	-.05	
MathSk						.94		.03		2.18		1.18			.65		.25		1.19		.54			.29		-.00	.99	.64	
						.11		.00		.24		.13			.16		.06		.29		.13			.06		-.00	.19	.12	
MathAng						.81		.76		1.70		.07			.48		.37		1.03		.23			.33		.24	.67	-.30	
						.09		.09		.19		.01			.12		.09		.25		.06			.06		.05	.13	-.06	
MathSwe						.49		.86		.58		-.62			.05		.22		.26		-.19			.44		.54	.32	-.43	
						.06		.10		.07		-.07			.01		.05		.06		-.05			.08		.10	.06	-.08	
MathInt						-.91		-1.00		-2.69		-.98			-.79		-.91		-1.89		-.88			.12		-.31	-.80	-.10	
						-.10		-.11		-.30		-.11			-.19		-.22 ^(*)		-.46		-.21			.02		-.06	-.15	-.02	
Gr*	1.20			-1.28	-.06			.04		-.02		-.61			-1.33		-.02		-.78		-.08		1.01		.05		-.03	.82	.07
WKom-	.09			-.10	-.00			.00		-.00		-.10			-.23		-.00		-.13		-.01		.13		.01		-.00	.11	.01
pUnt																													
Gr*	.09			1.78	.76			.80		.38		1.19			1.41		.64		1.12		.72		.08		.37		.12	-.32	-.34
WKom-	.01			.14	.06			.06		.03		.20			.23		.11		.18		.12		.01		.05		.02	-.04	-.04
pErl																													
Gr*	-2.04			-1.05	.32			-1.54		.08		-1.10			-.88		-.46		-.97		-.44		-.47		-.17		.78	-.56	.52
WNützlich	-.17			-.09	.03			-.13		.01		-.20			-.16		-.08		-.18		-.08		-.07		-.02		.11	-.08	.07
Gr* WVer-	.20			-1.01	-2.21			-1.29		-2.64		-.44			-.01		-.57		-.15		-.85		-1.53		-1.00		-1.65	-1.14	-1.79
stUnt	.02			-.08	-.18 ^(*)			-.11		-.22		-.08			-.00		-.10		-.03		-.15		-.21		-.14		-.23*	-.16	-.25*

Grafische Darstellung der Interaktionen zwischen der Feedbackwahrnehmung und der Feedbackbedingung:

Vor allem das Vorwissen zur Bruchrechnung, also die Bruchrechenleistung zu Mzp 1, scheint ein entscheidender Prädiktor für die Bruchrechenleistung nach der Intervention zu sein, aber auch die Feedbackwahrnehmung erklärt – wenn auch nicht im gleichen Maße – die Bruchrechenleistung (Mzp 2). Tiefergehend soll analysiert werden, ob der Effekt der Feedbackwahrnehmung von der Feedbackgruppe moderiert wird. Die grafischen Darstellungen weiterer signifikanter Interaktionseffekte zwischen der Feedbackgruppe und der Bruchrechenleistung (Mzp 1), den Variablen bezogen auf digitale Medien sowie den motivational-emotionalen Variablen aus Tabelle 27 sind in Anhang 14 dargestellt.

Die Interaktion zwischen der wahrgenommenen Verstehensunterstützung und der Feedbackbedingung scheint einen Teil der Varianz des prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung zu erklären. Dabei zeigt sich, dass die Lernenden der EG 1 mit zunehmender positiver Verstehensunterstützung höheres prozedurales Wissen zu Mzp 2 aufweisen. Die Lernenden der EG 2, die sich in ihrem Lernen durch das Feedback stärker in ihrem Verstehen unterstützt fühlen, erlangen wiederum schlechteres prozedurales Wissen zu Mzp 2 (vgl. Abbildung 37). Hinsichtlich der Interaktion zwischen der wahrgenommenen konstruktiven Unterstützung und der Feedbackbedingung steigt für die EG 1 als auch die EG 2 das prozedurale Wissen mit zunehmender positiver Wahrnehmung der konstruktiven Unterstützung (vgl. Abbildung 38).

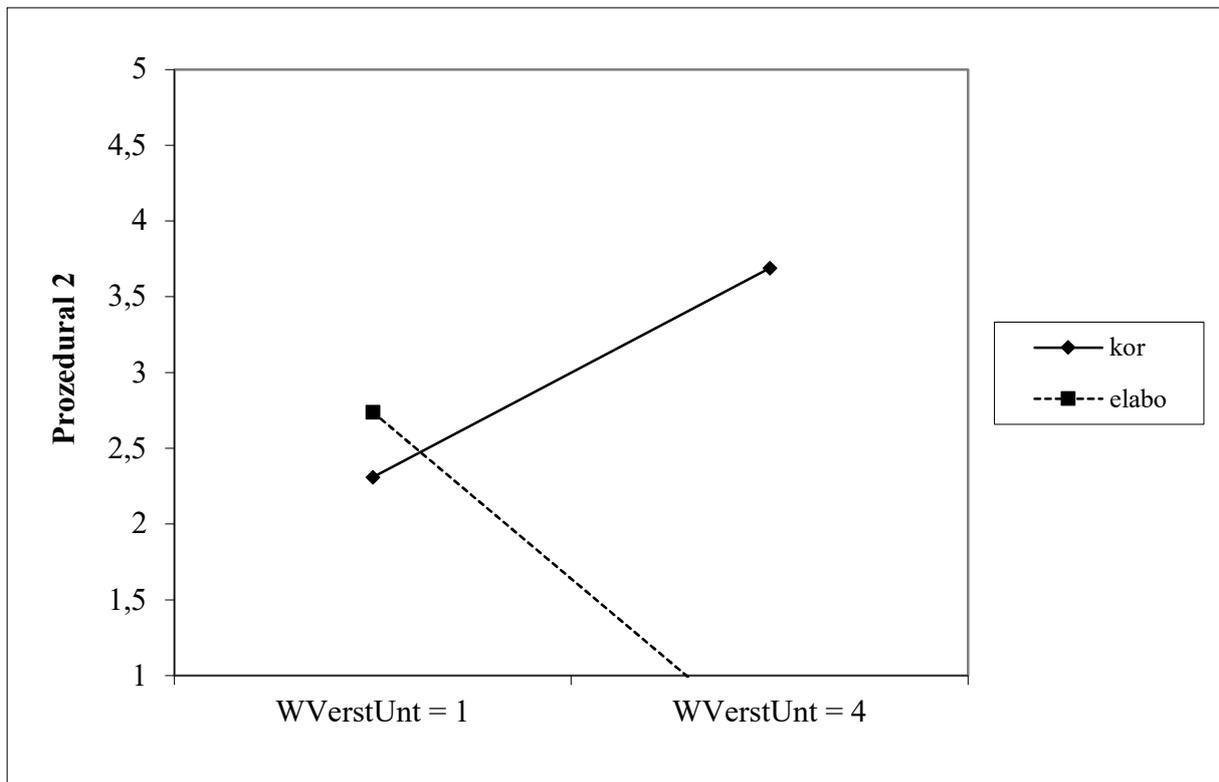


Abbildung 37: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen Verstehensunterstützung (= WVerstUnt) und dem prozeduralen Wissen zur Bruchrechnung

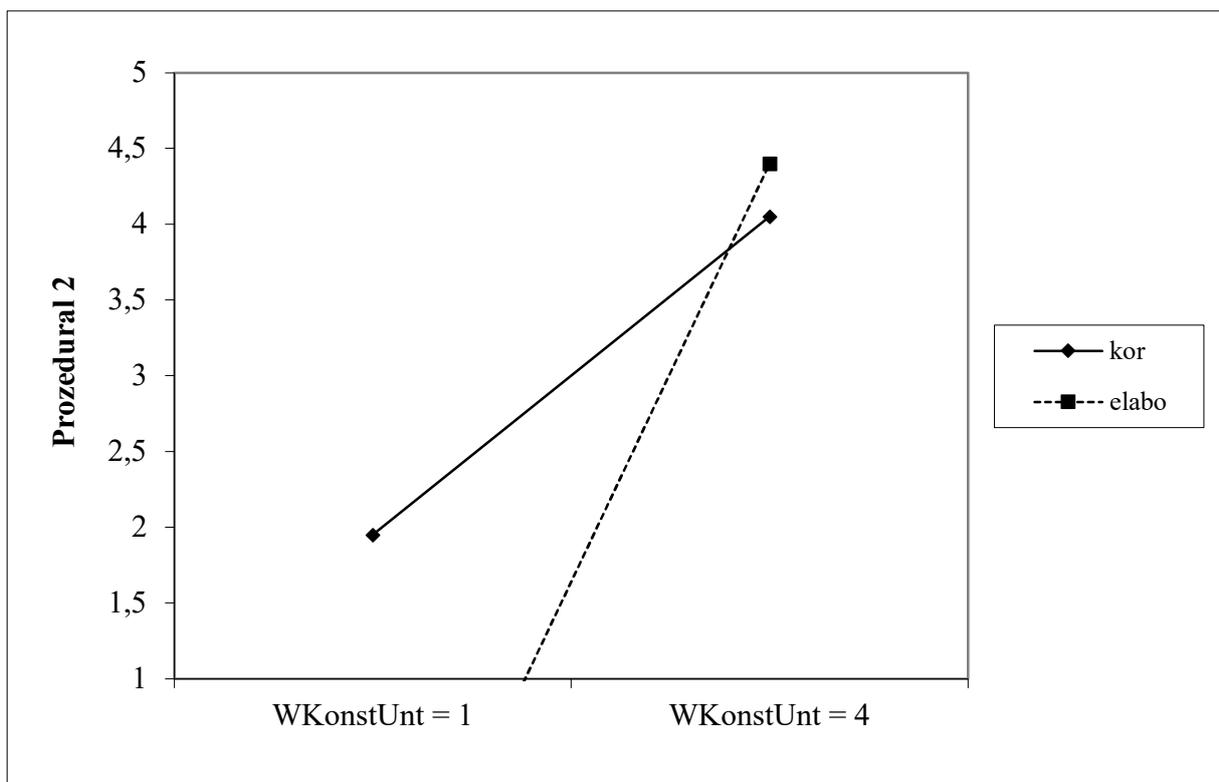


Abbildung 38: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen konstruktiven Unterstützung (= WKonstUnt) und dem prozeduralen Wissen zur Bruchrechnung

4.1.2 Einfluss der Feedbackwahrnehmung auf die Motivation und Emotionen

Bei Untersuchung der direkten sowie indirekten Effekte der Feedbackbedingung auf die drei Subskalen der Motivation und Emotionen mediiert über die Feedbackwahrnehmung lassen sich lediglich direkte Effekte der Feedbackwahrnehmung auf die intrinsische Motivation sowie das situative Interesse feststellen. Es zeigt sich, dass alle Subskalen der Feedbackwahrnehmung die intrinsische Motivation sowie das situative Interesse steigern (vgl. Tabelle 28). Direkte oder indirekte Effekte der Feedbackbedingung erscheinen als nicht signifikant. Außerdem erweist sich die Feedbackwahrnehmung für die Belastung nicht als signifikanter Prädiktor.

Tabelle 28: Ergebnisse der Mediationsmodelle zur Vorhersage der Motivation und Emotionen

	Intrin Motivativ		Situativ In	
	β	KI	β	KI
WKompUnt	.67	[0.47; 0.87]	.74	[0.51; 0.93]
WKompErl	.75	[0.54; 0.91]	.75	[0.51; 0.93]
WNützlich	.46	[0.19; 0.62]	.46	[0.26; 0.67]
WVerstUnt	.66	[0.46; 0.87]	.67	[0.45; 0.86]
WKonstUnt	.66	[0.50; 0.81]	.74	[0.56; 0.90]

Es werden hierarchische Moderationsmodelle unter Einbezug weiterer potenzieller Einflussfaktoren untersucht, um zu analysieren, inwiefern die Feedbackwahrnehmung die Motivation und Emotionen von Lernenden beeinflusst. Die Ergebnisse sind in Tabelle 29 dargestellt.

Vor allem die wahrgenommene Verstehensunterstützung sowie die konstruktive Unterstützung scheinen die intrinsische Motivation zu erklären. Es gilt: Fühlen sich die Lernenden in ihrem Verstehen unterstützt und nehmen das Feedback als konstruktiv unterstützend wahr, steigt ihre intrinsische Motivation. So wird unter Kontrolle der Bruchrechenleistung (Mzp 1), Variablen bezogen auf digitale Medien und motivational-emotionale Variablen, von denen keine Variable signifikante Regressionskoeffizienten aufweist, bis zu 40 % der Varianz der intrinsischen Motivation erklärt.

Bezüglich des situativen Interesses und der Belastung sind es das wahrgenommene Kompetenzerleben als auch die konstruktive Unterstützung die signifikante Regressionskoeffizienten aufweisen. Es zeigt sich: Je mehr sich die Lernenden in ihrer Kompetenz unterstützt fühlen, desto höher ist ihr situatives Interesse, aber auch ihre selbstberichtete Belastung. Außerdem gehen mit einer positiveren Wahrnehmung der konstruktiven Unterstützung, ein höheres situatives Interesse und eine geringere Belastung einher. Das situative Interesse scheint darüber hinaus durch die selbsteingeschätzten digitalen Kompetenzen der Lernenden, die Motivation be-

zogen auf das Fach Mathematik sowie das Interesse am Fach Mathematik beeinflusst zu werden. Unter Kontrolle dieser und weiterer in Tabelle 29 dargestellten Variablen erklärt sich bis zu 54 % des situativen Interesses. Auf die negative Emotion „Belastung“ hat das Selbstkonzept bezogen auf das Fach Mathematik einen signifikanten Einfluss, wobei sich Lernende mit einem höheren Selbstkonzept weniger belastet fühlen. Von der Belastung lassen sich rund 24 % der Varianz durch die analysierten Modelle erklären.

Hinsichtlich der in den hierarchischen Moderationsanalysen eingefassten Interaktionen lassen sich keine signifikanten Effekte von der Interaktion zwischen der Feedbackwahrnehmung und Feedbackbedingung auf die Motivation und Emotionen feststellen. Alle grafischen Darstellungen der signifikanten Interaktionen zwischen der Feedbackbedingung und den weiteren in den Modellen aufgenommenen Variablen befinden sich in Anhang 15.

Tabelle 29: Ergebnisse der Regressionsmodelle mit Interaktionseffekten zur Vorhersage der intrinsischen Motivation, des situativen Interesses und der Belastung

	Intrinsische Motivation					Situatives Interesse					Belastung												
	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 1	M 2	M 3	M 4	M 5								
Gruppe	-.10	-.10	-.11	-.13	-.09	-.07	-.07	-.07	-.08	-.06	-.05	-.06	-.04	.00	-.01	-.02	.00	-.01	.17	-.02	-.01	-.03	.16
Feedbackwahrnehmung																							
WKompUnt	.07	.08	.04	.10	.10	.13	.06	.13	.06	.13	.06	.13	.06	.13	.06	.13	.06	.13	.06	.13	.06	.13	.06
WKompErl	.14	.19	.19	.12	.12	.12	.11	.09	.20	.25	.27	.21	.23	.16	.18	.15	.16	.31	.17	.15	.31	.29	.11
WNützlich	.18	.25*	.25*	.16	.16	.16	.14	.12	.25(*)	.32**	.35***	.26(*)	.29(*)	.21*	.23*	.19	.20	.49	.27*	.24(*)	.49*	.46*	.17
WVerstUnt	.02	-.02	-.02	.02	.02	-.03	-.03	.04	.03	.01	.01	.02	.01	.00	.01	.01	.01	-.10	-.07	-.06	-.10	-.10	-.04
WKonstUnt	.02	-.02	-.02	.02	.02	-.04	-.04	.05	.04	.02	.01	.03	.02	.02	.01	.02	.02	-.16	-.11	-.10	-.16	-.16	-.06
	.20	.16	.17	.25	.20	.13	.14	.19	.13	.00	.09	.07	.05	-.00	.05	-.03	-.08	.14	.12	.11	.13	.14	.07
	.26(*)	.22*	.22*	.33*	.27(*)	.17	.18(*)	.25	.17	.00	.11	.09	.07	-.01	.06	-.04	-.10	.23	.18	.18	.20	.23	.11
	.10	.16	.16	.08	.11	.17	.14	.16	.21	.24	.19	.21	.24	.24	.28	.29	-.26	-.19	-.17	-.26	-.27	-.18	-.17
	.13	.21(*)	.21(*)	.11	.14	.23*	.23*	.19	.22	.27(*)	.30**	.30**	.24(*)	.27(*)	.30**	.31**	.35*	.37*	-.42*	-.30*	-.27(*)	-.41*	-.42*
Bruchrechenleistung (Mzp 1)																							
LeistGes1	.01		-.09	.01		-.11				-.05			-.04		-.11			-.09		.03		-.02	
	.02		-.12	.01		-.15				-.06			-.05		-.14				.14(*)		.05		-.03
LeistKonz1			-.01	.04		-.01		-.03		.05		.09	.07		.05				-.09		-.06		-.05
			-.01	.05		-.01		-.04		.06		.12	.08		.06				-.14		-.10		-.08
LeistProz1			.02	-.05		-.01		.01		.01		-.04	-.03		-.02				-.01		.03		-.01
			.02	-.06		-.02		.01		.01		-.05	-.04		-.03				-.01		.05		-.02
Variablen bezogen auf digitale Medien																							
DigMedEinst					-.00	-.00	-.01	-.02					.03	.03	-.06	-.07						.00	.01
					-.01	-.00	-.01	-.03					.04	.04	-.08	-.09						.01	.01
DigMed-Komp					-.08	-.08	-.04	-.07					-.12	-.13	-.04	-.06						-.02	-.02
					-.10	-.10	-.06	-.09					-.16*	-	-.05	-.07						-.04	-.04
DigMedInt						.09	.09	.14	.17				.08	.08	.14	.15						-.02	-.01
					.12	.12	.18	.22					.10	.10	.18	.19						-.03	-.01
Motivational-emotionale Variablen																							
MathMot					.08	.08	.16	.17					.03	.03	.29	.28						.03	.04
					.10	.10	.21	.23					.04	.04	.37*	.35(*)						.05	.06
MathSk					-.08	-.08	-.23	-.21					-.05	-.07	-.19	-.19						-.20	-.19
					-.11	-.10	-.30	-.28					-.07	-.10	-.24	-.24						-	-
MathAng					-.03	-.03	-.19	-.15					.00	.01	-.10	-.06						.32*	.31(*)
					-.04	-.04	-.25	-.20					.00	.01	-.12	-.08						.16	.16
MathSwe					-.07	-.07	-.06	-.03					-.12	-.11	-.08	-.05						.26*	.26*
					-.09	-.10	-.08	-.04					-.15	-.14	-.10	-.07						.06	.05
MathInt					.18	.18	.03	.03					.28	.27	.00	.02						.09	.08
					.24(*)	.24(*)	.04	.04					.35**	.35**	.00	.02						.05	.06
Gr* WKompUnt	.02		-.00	.03		.11	.11	-.11				-.09	-.09			.09	.09	-.01			.11	-.01	.11
	.02		-.00	.02		.11	.11	-.10				-.08	-.08			.08	.08	-.01			.13	-.01	.12
Gr* WKompErl	.17		.18	.17		.10	.10	.14				.14	.12			.06	.06	-.27			-.31	-.29	-.23
	.16		.16	.15		.09	.09	.12				.12	.11			.05	.05	-			-	-	-.24
Gr* WNützlich	-.10		-.09	-.09		-.11	-.12	-.07				-.06	-.05			-.07	-.07	.29(*)			.34(*)	.32(*)	-.01
	-.10		-.09	-.09		-.11	-.12	-.06				-.06	-.05			-.07	-.07	.16			.10	.13	-.01

4.2 Feedbacknutzung

Forschungsfrage 4: (Inwiefern) Beeinflusst die Feedbacknutzung die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen?

4.2.1 Einfluss der Feedbacknutzung auf die Bruchrechenleistung

Für EG 1 ergibt sich für den Einfluss der Feedbacknutzung auf die Bruchrechenleistung (Mzp 2) kein signifikanter Effekt.

Für die EG 2 wird der Einfluss der Feedbacknutzung auf die Bruchrechenleistung (Mzp 2) jeweils über die Dauer und Häufigkeit der Feedbacknutzung analysiert. Tabelle 30 zeigt die Ergebnisse der Analysen. Es werden lediglich Modelle mit der Gesamtdauer und -häufigkeit der Feedbacknutzung als Prädiktoren der Gesamttestleistung, des konzeptuellen Wissens sowie des prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung dargestellt, da kein Modell für die einzelnen Hilfen als signifikant erschien. Außerdem umfassen die Analysen die Untersuchung von potenziellen Interaktionseffekten. Dies begründet sich in den Ergebnissen von Forschungsfrage 2. Im Zuge der Beantwortung von Forschungsfrage 2 wurde das Vorwissen zur Bruchrechnung als Prädiktor des Feedbacknutzungsverhaltens ausgemacht. Genauer gesagt wurde gezeigt, dass Lernende mit höherem Vorwissen zur Bruchrechnung das Feedback weniger nutzen, bzw. Lernende mit geringerem Vorwissen mehr Gebrauch von dem Feedback machen. Um zu überprüfen, ob mögliche Effekte der Feedbacknutzung auf die Bruchrechenleistung (Mzp 2) durch das Vorwissen zur Bruchrechnung moderiert werden, werden mögliche Interaktionseffekte untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich durch die Nutzungshäufigkeit des Feedbacks 4 % der Varianz der Bruchrechenleistung (Mzp 2) des Gesamttestergebnisses und 5 % des konzeptuellen Wissens zur Bruchrechnung erklären lassen. Als auffällig erscheint dabei vor allem, dass sich die signifikanten Regressionskoeffizienten als negativ darstellen. Das heißt konkret: Je häufiger die Lernenden das Feedback nutzen, desto schlechter schneiden sie im Bruchrechentest ab. Die signifikanten Effekte der Feedbacknutzung auf die Bruchrechenleistung (Mzp 2) verschwinden jedoch unter Hinzunahme der Bruchrechenleistung (Mzp 1). Für das prozedurale Wissen zur Bruchrechnung stellt sich die Feedbacknutzung nicht als signifikanter Prädiktor heraus.

Grafische Darstellung der Interaktionen zwischen der Bruchrechenleistung (Mzp 1) und der Feedbacknutzung:

Zusätzlich werden die Interaktionen zwischen der Feedbacknutzung und der Bruchrechenleistung (Mzp 1) untersucht und deren Einfluss auf die Bruchrechenleistung der Lernenden nach der Intervention. Da es sich bei dem Moderator „Bruchrechenleistung Mzp1“ um eine stetige Variable handelt, werden Johnson-Neymann-Diagramme zur grafischen Darstellung der Interaktionen unter Bezugnahme der z-standardisierten Werte dargestellt. Die Diagramme wurden auf einem Signifikanzniveau von $p < .05$ berechnet.

Über alle drei Johnson-Neymann-Diagramme hinweg zeigt sich allgemein formuliert, dass Lernende mit geringem Vorwissen mit zunehmender Feedbacknutzung eine schlechtere Bruchrechenleistung (Mzp 2) aufweisen (vgl. Abbildung 39-42). Mit zunehmendem Vorwissen verschwindet der signifikante Effekt jedoch und das Vorwissen zur Bruchrechnung hat keinen moderierenden Effekt. Das heißt je höher die Bruchrechenleistung zu Mzp 1, desto eher ist die Feedbacknutzung irrelevant für die Bruchrechenleistung nach der Intervention (Mzp 2).

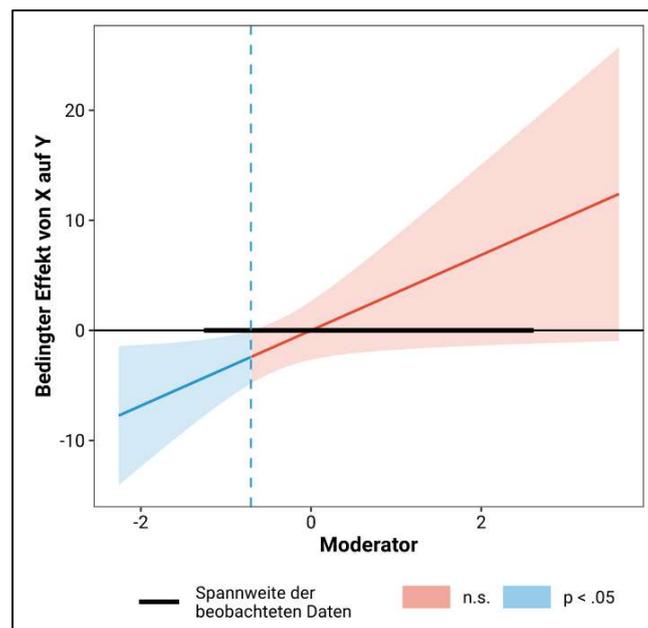


Abbildung 39: Moderierender Einfluss der Bruchrechenleistung (Mzp 1) (= Moderator) auf den Zusammenhang zwischen der Feedbacknutzungsdauer (= X) und der Bruchrechenleistung (= Y), Anmerkung: Wenn der Moderator außerhalb des Intervalls [-0.71, 8.19] liegt, ist der bedingte Effekt von X auf Y signifikant, $p < .05$

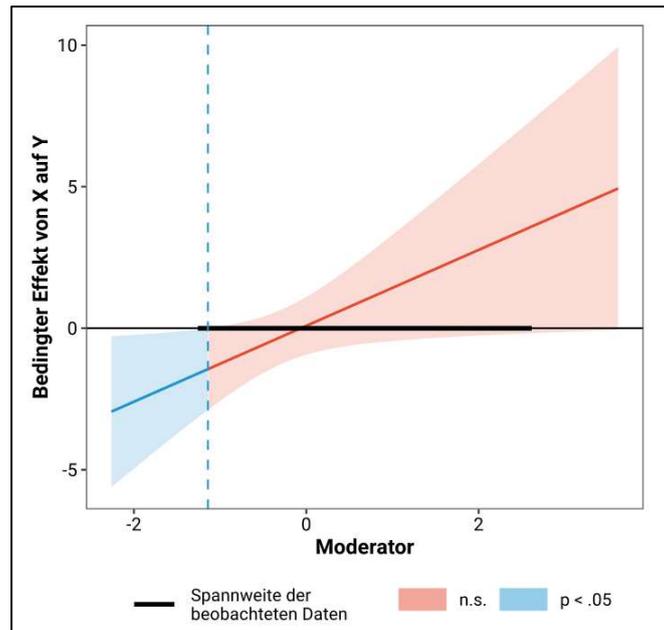


Abbildung 40: Moderierender Einfluss der Bruchrechenleistung (Mzp 1) (= Moderator) auf den Zusammenhang zwischen der Feedbacknutzungsdauer (= X) und dem konzeptuellen Wissen zur Bruchrechnung (Mzp 2) (= Y), Anmerkung: Wenn der Moderator außerhalb des Intervalls [-1.14, 4.18] liegt, ist der bedingte Effekt von X auf Y signifikant, $p < .05$

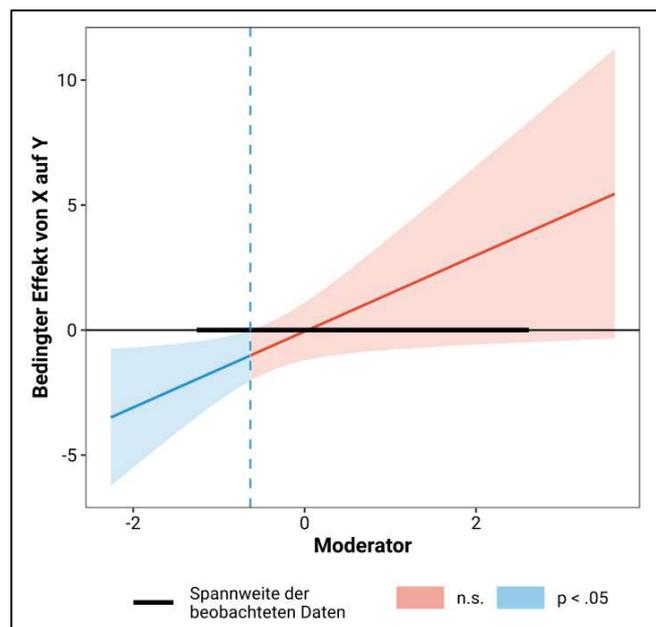


Abbildung 41: Moderierender Einfluss der Bruchrechenleistung (Mzp 1) (= Moderator) auf den Zusammenhang zwischen der Feedbacknutzungshäufigkeit (= X) und dem konzeptuellen Wissen zur Bruchrechnung (= Y), Anmerkung: Wenn der Moderator außerhalb des Intervalls [-0.63, 6.36] liegt, ist der bedingte Effekt von X auf Y signifikant, $p < .05$

4.2.2 Einfluss der Feedbacknutzung auf die Motivation und Emotionen

Für die EG 1 lässt sich kein signifikanter Effekt der Feedbacknutzung auf die drei Subskalen der Motivation und Emotionen feststellen.

Ob und inwiefern die Feedbacknutzung der EG 2 auf die Motivation und Emotionen wirkt, zeigen Tabelle 31 und Tabelle 32. Die Nutzungsdauer des Feedbacks scheint unter Kontrolle der Bruchrechenleistung (Mzp 1) einen Einfluss auf die intrinsische Motivation zu nehmen. Auch das Gesamtergebnis sowie das prozedurale Wissen zur Bruchrechnung (Mzp 1) zeigen sich als signifikante Prädiktoren der intrinsischen Motivation. Für das situative Interesse stellen sich ebenfalls die Feedbacknutzungsdauer sowie die Gesamtergebnisse als signifikante Prädiktoren heraus. Für die intrinsische Motivation und das situative Interesse gilt den Ergebnissen der Analysen folgend: Je länger das Feedback genutzt wurde und je höher das Vorwissen zur Bruchrechnung der Lernenden, desto mehr sind die Lernenden intrinsisch motiviert und weisen ein höheres situatives Interesse auf. Bezüglich der Belastung der Lernenden durch das Arbeiten mit der Lernplattform hat lediglich die Häufigkeit der Feedbacknutzung einen Einfluss, wobei dieser Einfluss unter Kontrolle der Bruchrechenleistung verschwindet. Es gilt: Je häufiger die Lernenden das Feedback nutzen, desto belasteter fühlen sie sich und je besser das Gesamtergebnis sowie das Ergebnis des prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung ausfällt, desto weniger belastet fühlen sich die Lernenden.

Tabelle 31: Ergebnisse der Regressionsmodelle mit Interaktionseffekten zur Vorhersage der intrinsischen Motivation

	Intrinsische Motivation									
	M 1	M 1.1	M 2	M 2.1	M 2.2	M 2.3	M 3	M 3.1	M 3.2	M 3.3
Feedbacknutzung										
NutzDauGes	.17		.22	.19			.25	.22		
	.21		.27*	.24			.31*	.27*		
NutzHäufGes		.07			.15	.13			.20	.21
		.09			.19	.16			.25	.27
Bruchrechenleistung (Mzp 1)										
LeistGes1			.22		.22		.25		.27	
			.28*		.28*		.32*		.35*	
LeistKonz1				-.12		-.13		-.09		-.06
				-.15		-.16		-.12		.08
LeistProz1				.29		.30		.27		.28
				.37**		.38*		.34*		.35*
LeistGes1*NutzDauGes							.09			
							.10			
LeistKonz1*NutzDauGes								.29		
								.29(*)		
LeistProz1*NutzDauerGes								-.10		
								-.10		
LeistGes1*NutzHäufGes									.12	
									.12	
LeistKonz1*NutzHäufGes										.37
										.39(*)
LeistProz1*NutzHäufGes										-.10
										-.10
Signifikanz	.09	.46	<.05	<.05	.07	.06	<.05	<.05	.12	<.05
R ² _{korr}	.03	-.01	.09	.10	.05	.07	.08	.13	.04	.12

Abschnitt E Diskussion

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zum Verstehen der Wirksamkeit von Feedback auf digitalen Lernplattformen liefern. Im Kontext der Frage, wann Feedback tatsächlich den Lernerfolg – „Lernerfolg“ impliziert im Sinne dieser Arbeit nicht nur die Steigerung der Leistung, sondern auch die Ausbildung hoher Motivation und positiver Emotionen – steigern kann, sollte verstanden werden, wie Schüler*innen die Lernplattform im Allgemeinen und das implementierte Feedback im Speziellen wahrnehmen und eben dieses zum Verstehen der Bruchrechnung (= konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung) einerseits und zum Aneignen von Regelmäßigkeiten (= prozedurales Wissen zur Bruchrechnung) andererseits nutzen. Dazu wurden unter Einbezug fachunabhängiger psychologischer Erkenntnisse sowie fachdidaktischer Arbeiten zwei Feedbackgruppen generiert, die zum einen eine „typische“ Lehr-Lern-Situation mit nur wenig komplexen Feedback sowie ein aus empirischer Sicht lernförderliches Feedback widerspiegeln – beides jeweils implementiert in eine Lernplattform. Für ein tiefergehendes Verständnis der Wirksamkeit beider Feedbackarten wurden Daten einer Interventionsstudie erhoben und analysiert. Nachfolgend werden (1) die in Abschnitt D ausführlich dargestellten Forschungsergebnisse zusammengefasst und Forschungsfragen beantwortet sowie Hypothesen (vgl. Abschnitt C, Kapitel 7) ggf. falsifiziert, bzw. verifiziert. Gleichzeitig werden hinsichtlich der zentralen Ergebnisse, unter Berücksichtigung der Theorie – wobei aufgrund der Ähnlichkeit des Studiendesigns die Ergebnisse mit denen einer Co²Ca-Teilstudie²⁶ verglichen werden – (2) mögliche Erklärungen der Ergebnisse dargelegt und darauf aufbauend (3) Implikationen zur Verbesserung von Lehr-Lern-Prozessen diskutiert. Daran anschließend erfolgt (4) eine kritische Reflektion der Limitationen dieser Arbeit. Schließen soll die Arbeit mit (5) einem Ausblick bezogen auf mögliche anknüpfende Forschungsfragen.

1 Zentrale Ergebnisse und mögliche Erklärungen zu den Ergebnissen

Die im Kontext einer breiten Diskussion um die Wirksamkeit und (effektiven) Nutzung von Feedback auf digitalen Lernplattformen in dieser Arbeit formulierten Forschungsfragen konzentrieren sich darauf, inwiefern „typische“ Selbstlernsituationen mit einfachem verzögertem Feedback im Vergleich zu elaboriertem Feedback, welches aus lerntheoretischer Perspektive

²⁶ 146 Neuntklässler*innen nahmen an der Co²Ca-Studie teil und erhielten von ihrer Lehrkraft entweder prozessorientiertes (ähnlich elaboriertem Feedback) oder notenorientiertes Feedback (ähnlich KR) hinsichtlich mathematischer Aufgaben. Befragt wurden die Lernenden unter anderem nach der wahrgenommenen Nützlichkeit des Feedbacks und ihrem Interesse (Harks et al., 2013).

effektiver sein soll, das Lernen sowie die Motivation und positive Emotionen von Schüler*innen potenziell fördert. Dabei wird zum einen ein besonderer Analyseschwerpunkt auf die Frage gelegt, ob sowohl konzeptuelles Wissen als auch prozedurales Wissen zur Bruchrechnung durch die Lernplattform im Allgemeinen und das Feedback im Speziellen gefördert werden kann. Zum anderen liegt ein Schwerpunkt auf der Lernendenperspektive in Form der Wahrnehmung und Nutzung von Feedback. In Bezug zu diesen Forschungsfragen konnten auf der Grundlage empirischer Analysen folgende Ergebnisse aufgezeigt werden:

Forschungsfrage 1: (Inwiefern) Unterscheiden sich die beiden Feedbackbedingungen hinsichtlich der Bruchrechenleistung (Mzp 2), der Motivation und Emotionen sowie der Feedbackwahrnehmung?

Hypothese 1: Die Lernenden der EG 1 „KR“ verfügen im Mittel über signifikant schlechtere Bruchrechenleistung (Mzp 2) als die Lernenden der EG 2 „elabo“.

Zentrales Ergebnis: Sowohl das Verstehen (= konzeptuelles Wissen zur Bruchrechnung) als auch das Beherrschen von Rechenregeln (= prozedurales Wissen zur Bruchrechnung) wurden durch einfaches Feedback ähnlich stark wie durch elaboriertes Feedback gefördert. Die Hypothese, dass Lernende, die weniger komplexes Feedback (KR) erhalten, schlechtere Bruchrechenleistung ausbilden, kann demnach für diese Arbeit abgelehnt werden.

Hypothese 1.1: Die Lernenden der EG 1 „KR“ verbessern sich im Mittel von Mzp 1 zu Mzp 2 signifikant weniger hinsichtlich ihrer Bruchrechenleistung im Vergleich zu den Lernenden der EG 2 „elabo“.

Zentrales Ergebnis: Die Ergebnisse zeigen, dass das Arbeiten mit einer Lernplattform im Allgemeinen die Bruchrechenleistung der Lernenden fördert. Allerdings weisen die Lernenden, die elaboriertes Feedback erhalten, im Mittel zwar eine höhere Verbesserung von Mzp 1 zu Mzp 2 auf, jedoch erscheint dieser Unterschied zwischen den EG als nicht signifikant. Hypothese 1.1 lässt sich bezogen auf die vorliegenden Ergebnisse demnach nicht bestätigen.

Hypothese 1.2: Die Lernenden der EG 1 „KR“ und der EG 2 „elabo“ verfügen im Mittel über differenzierende Motivation und Emotionen.

Zentrales Ergebnis: Parallel dazu, ob verschiedene Feedbackarten die Bruchrechenleistung fördern, wurde nach dem Einfluss von Feedback auf die Motivation und Emotionen gefragt. Diesbezüglich lässt sich festhalten: Ob Lernende einfaches Feedback im Vergleich zu komplexem

Feedback erhalten, macht keinen Unterschied bezogen auf ihre Motivation und Emotionen. Hypothese 1.2 findet also in den vorliegenden Daten keine Bestätigung.

Hypothese 1.3: Die Lernenden der EG 1 „KR“ nehmen das Feedback im Mittel signifikant schlechter wahr als die Lernenden der EG 2 „elabo“.

Zentrales Ergebnis: Einfaches KR Feedback wird ähnlich wie elaboriertes Feedback wahrgenommen. Hypothese 1.3 lässt sich demnach nicht bestätigen.

Forschungsfrage 1.1: Inwiefern nutzen die Lernenden das angebotene Feedback der Lernplattform?

Zentrales Ergebnis: Nicht einmal ein Drittel der Lernenden nutzte die Möglichkeit nach Erhalt des Feedbacks, welche Aufgabe richtig und welche falsch gelöst wurde (KR), die Aufgaben erneut zu bearbeiten. Die Nutzung elaborierten Feedbacks in Form von Hilfen wurde von den Lernenden sehr heterogen in Anspruch genommen.

Erklärungen der Ergebnisse hinsichtlich Forschungsfrage 1 und 1.1:

Bruchrechenleistung (H. 1 & H. 1.1). Die Ergebnisse, dass sich die Bruchrechenleistung der Lernenden nach der Intervention nicht unterscheidet (H. 1) und sich die Lernenden insgesamt zwar in ihrer Bruchrechenleistung verbessern, sich diese Verbesserung aber nicht durch das unterschiedliche Feedback erklären lässt (H. 1.1), scheinen im ersten Moment widersprüchlich zu bisherigen Forschungsergebnissen. Allerdings weisen die vorliegenden Ergebnisse Überschneidungen zu denen einer Co²Ca-Teilstudie auf. Auch im Rahmen der Co²Ca-Teilstudie konnten keine signifikanten Unterschiede in der mathematischen Leistung der Lernenden gefunden werden. Als möglicher Grund wird unter anderem die einmalige Präsentation des Feedbacks, ohne die Möglichkeit aus den Fehlern zu lernen und neu gewonnene Kenntnisse einzusetzen und zu festigen, genannt (Harks et al., 2013). Zwar wurde aus eben diesem Grund in der vorliegenden Studie innerhalb der Intervention zwei Aufgaben von gleicher Struktur hintereinandergeschaltet, allerdings könnte dies zu kurz gegriffen sein und ein „Übungseffekt“ dadurch ausgeblieben sein.

Darüber hinaus weisen die Forschungsergebnisse zum Konstrukt „Feedback“ eine allgemeine Heterogenität auf und die Frage, wann Feedback als lernwirksam erscheint, gilt noch als ungeklärt. So müssen beispielsweise Hilfen als ein Teil elaborierten Feedbacks auf „task-motivation processes“ aufmerksam machen und Informationen bezüglich „erroneous hypothesis“ liefern

(Hattie, 1999) sowie klar formuliert sein und mehrere Erklärungsansätze präsentieren (Lysakowski, 1982). Dabei gilt allerdings auch zu beachten, dass elaboriertes Feedback schlicht zu lang sein und somit von Lernenden ignoriert werden oder zu einem überhöhten cognitive load führen kann (Lysakowski, 1982; Sweller et al., 2011). Wie ausführlich Feedback sein sollte, bzw. welche und wie viele Informationen Feedback enthalten sollte, hängt unter anderem auch von individuellen Lernendeneigenschaften, wie dem Vorwissen, ab (Narciss & Huth, 2004). Da aufgrund der Schulform sowie Lernlücken ausgelöst durch den zeitweisen Distanzunterrichts von einer leistungsschwachen Stichprobe mit geringem Vorwissen auszugehen war, schien die Präsentation direkten und elaborierten Feedbacks aus lerntheoretischer Sicht am förderlichsten (Morrison et al., 1995; Fyfe & Rittle-Johnsson, 2016). Eventuell wurde das Vorwissen der Lernenden jedoch unterschätzt und die Lernenden konzentrierten sich vermehrt auf die Rückmeldung zur Leistung und weniger auf die zusätzlichen Informationen des elaborierten Feedbacks (Kluger & DeNisi, 1996), bzw. waren durch die zusätzlichen Informationen einer nicht notwendigen kognitiven Belastung ausgesetzt (Kalyuga et al., 2003).

Motivation und Emotionen (H. 1.2). Die vorliegenden Ergebnisse zu Hypothese 1.2 weisen Überschneidungen zu den Ergebnissen einer Co²Ca-Teilstudie auf, in der die Entwicklung des themenspezifischen Interesses untersucht wurde. Auch in der Co²Ca-Teilstudie zeigte sich kein Unterschied im Interesse zwischen der einfachen und der elaborierten Feedbackgruppe. Zwar soll elaboriertes Feedback die Motivation in einem höheren Maße als einfaches Feedback steigern und positive Emotionen fördern, allerdings kann (elaboriertes) Feedback vor allem beim häufigen Scheitern, also negativem Feedback, die Aufmerksamkeit der Lernenden von der Aufgabe weg hinzu negativen Emotionen lenken (Kluger & DeNisi, 1996).

Feedbackwahrnehmung (H. 1.3). Dass die Lernenden einfaches Feedback ähnlich wie das elaborierte Feedback wahrnehmen (H. 1.3), erscheint konträr zu bisherigen Forschungsergebnissen (Harks et al., 2013; Smits et al., 2008; van der Kleij et al. 2011). So zeigen die Ergebnisse von Harks et al. (2013), dass prozessbezogenes Feedback im Vergleich zu Feedback in Form von Noten als nützlicher wahrgenommen wird. Allerdings wurde das Feedback nicht von einer digitalen Lernplattform, sondern von Lehrkräften übermittelt. Dabei scheint die Wahrnehmung von Feedback innerhalb analoger Lehr-Lern-Situationen insbesondere vom Klassenklima abhängig zu sein (Gamlem & Smith, 2013). Inwieweit die „Beziehung“ zwischen den Lernenden und der digitalen Lernplattform von Relevanz ist, fand bis dato noch keine Berücksichtigung in Forschungsanalysen. Dabei scheint, unter Beachtung der Möglichkeit des anonymen Arbeitens und damit dem Arbeiten ohne Angst vor Fehlern, dieser Aspekt von möglicher Relevanz. Im

Gegensatz dazu kann natürlich angezweifelt werden, dass die Lernenden zu der Lernplattform eine wirkliche Beziehung aufbauen, wie sie es zu einer Lehrkraft tun können. Darüber hinaus wird davon gesprochen, dass Feedback als positiver wahrgenommen wird, wenn die Möglichkeit besteht, dieses Feedback umzusetzen (Pokorny & Pickford, 2010). Den Lernenden wurde zwar eine Möglichkeit zur Umsetzung des Feedbacks und dadurch erlangter Erkenntnisse durch eine zweite ähnliche Aufgabe geboten, allerdings greift dies eventuell nicht weit genug und die Lernenden nehmen das Feedback nicht als Chance zur Entwicklung neuer Fähigkeiten wahr. Als weitere mögliche Erklärung kann der „cognitive load“ herangezogen werden. Durch ein „zu viel“ an Informationen innerhalb des elaborierten Feedbacks könnten sich die Lernenden überfordert gefühlt und daher eine eingeschränkte positive Wahrnehmung erlebt haben. Schüler*innen der einfachen Feedbackgruppen wiederum arbeiteten in einem ihnen bekannten Lernsetting, wobei sich möglicherweise die Vertrautheit mit der Lernumgebung und nicht das Feedback per se positiv auf ihre Feedbackwahrnehmung auswirkte.

Feedbacknutzung. Die geringe Nutzung einfachen Feedbacks lässt sich möglicherweise durch die verzögerte Präsentation des Feedbacks erklären (Winstone et al., 2017). Aber auch ein Fehlen an Informationen, z. B. zum weiteren Vorgehen, kann Grund der fehlenden Feedbacknutzung sein (Fong & Schallert, 2023; Narciss, 2004). Vermuten lässt sich auch, dass die Lernenden weder durch internale noch externale Motivation einen Grund in der erneuten Bearbeitung der Aufgaben sahen. Die heterogene Nutzung elaborierten Feedbacks lässt sich mit den Studienergebnissen von Reinhold et al. (2021) in Einklang zu bringen. Diesbezüglich kann von einem zu großen Angebot an Informationen ausgegangen werden, das nicht alle Lernende nutzen (wollen), da durch die große Menge eine Überforderung hervorgerufen wird (van der Kleij & Lipnevich, 2020; Jonsson & Panadero, 2018).

Forschungsfrage 2: (Inwiefern) Haben Lernenden- und Feedbackeigenschaften einen Einfluss auf die Feedbackwahrnehmung sowie Feedbacknutzung der Lernenden?

Hypothese 2: Die Bruchrechenleistung (Mzp 1), Variablen bezogen auf digitale Medien, motivational-emotionale Variablen und die Feedbackpolung verändern die Wahrnehmung von Feedback.

Zentrale Ergebnisse: Die Feedbackwahrnehmung – konkret die wahrgenommene Kompetenzerstärkung, das wahrgenommene Kompetenzerleben sowie die wahrgenommene Nützlichkeit – lässt sich unter anderem durch die beiden motivational-emotionalen Variablen „Mathe-

matikangst“ und „Motivation bezogen auf das Fach Mathematik“ erklären. Dabei gilt: Je motivierter die Lernenden, aber auch, je größer die Mathematikangst, desto positiver nehmen sie das Feedback wahr. Dabei konnte gezeigt werden, dass matheängstlichere Lernende einfacheres Feedback (EG 1) positiver wahrnehmen als matheängstlichere Lernende, die komplexes Feedback (EG 2) erhalten. Darüber hinaus erklärt das Vorwissen zur Bruchrechnung die wahrgenommene Verstehensunterstützung. Lernende mit höherem Vorwissen fühlen sich also eher durch das Feedback in ihrem Verstehen unterstützt. Hinsichtlich des Einflusses der Bruchrechenleistung konnte auch gezeigt werden, dass die wahrgenommene Kompetenzunterstützung für EG 2 abhängig von dem Vorwissen zur Bruchrechnung ist. So steigt mit höherem Vorwissen auch die positive Feedbackwahrnehmung. Zusammenfassend lässt sich Hypothese 2 bedingt bestätigen.

Hypothese 2.1: Die Bruchrechenleistung (Mzp 1), Variablen bezogen auf digitale Medien, motivational-emotionale Variablen, die Feedbackwahrnehmung und die Feedbackpolung verändern die Nutzung von Feedback.

Zentrale Ergebnisse: Die Feedbacknutzung der EG 1 lässt sich nicht durch die ausgewählten Lernendeneigenschaften erklären. Für die Lernenden, die elaboriertes Feedback erhielten (EG 2), zeigt sich, dass vor allem Schüler*innen mit einem geringen Vorwissen zur Bruchrechnung häufiger, aber nicht länger, auf die Hilfen zurückgreifen. Auch eine positive Einstellung gegenüber digitalen Medien führt zu einer längeren Feedbacknutzung der Lernenden. Darüber hinaus lassen sich Lernende, die häufiger positives Feedback erhalten, seltener die Lösung anzeigen.

Erklärung der Ergebnisse hinsichtlich Forschungsfrage 2:

Feedbackwahrnehmung (H. 2). Der Einfluss verschiedener Lernenden- und Feedbackereigenschaften auf die Wahrnehmung von Feedback (H. 2) bestätigt bisherige Forschungsergebnisse in Teilen, bei denen unter anderem motivational-emotionale Variablen als Prädiktoren der Feedbackwahrnehmung herausgestellt wurden (van der Kleij & Lipnevich, 2020). Eine Begründung dafür, dass sich insbesondere die wahrgenommene Kompetenzunterstützung, das wahrgenommene Kompetenzerleben sowie die wahrgenommene Nützlichkeit durch motivational-emotionale Variablen und die wahrgenommene Verstehensunterstützung vor allem durch das Vorwissen zur Bruchrechnung erklären lassen, kann in der inhaltlichen Gestaltung der Items der Subskalen vermutet werden. Beim direkten Vergleich scheinen die Items der wahrgenommenen Verstehensunterstützung vor allem fachliche Facetten des Lernens anzusprechen (Beispielitem: „Die Lernplattform bietet die Möglichkeit zu verstehen, warum ein mathematisches Verfahren funktioniert.“). Lernenden mit höherem Vorwissen ist es vermutlich eher möglich

„mathematische Verfahren“ zu verstehen, während Lernenden mit geringerem Vorwissen das Verstehen schwerer fällt. Andersherum zielen die Items der wahrgenommene Kompetenzunterstützung, des wahrgenommene Kompetenzerlebens sowie der wahrgenommenen Nützlichkeit auf das „eigene Ich“ ab (Beispielitem des wahrgenommenen Kompetenzerlebens: „Durch die Rückmeldungen und Hilfen habe ich mich persönlich gefördert gefühlt.“), wodurch motivational-emotional angetriebene Steuerungsprozesse womöglich eine entscheidendere Rolle spielen. Dass matheängstliche Lernende einfaches Feedback positiver wahrnehmen als komplexes Feedback, lässt sich vermutlich durch deren Überforderung mit der Vielzahl an Informationen elaborierten Feedbacks erklären. So postulieren Balt und Herzog (2023): „Negative Überzeugungen wie „Mathe ist schwer“ oder „Ich kann kein Mathe“ sitzen oft so tief, dass mathematische Situationen als Bedrohung wahrgenommen werden und eine regelrechte Angst vor Mathematik entsteht.“ (S. 196). Die wahrgenommene Bedrohung kann das Arbeitsgedächtnis einschränken (C. Jacobs & Petermann, 2012) und damit einhergehend das elaborierte Feedback nur mit einem hohen kognitiven Aufwand durchdrungen und daher als negativer wahrgenommen werden.

Feedbacknutzung (H. 2.1). Dass Lernende mit geringem Vorwissen zur Bruchrechnung zwar häufiger auf das Feedback zugreifen, dieses aber nicht länger nutzen als Lernende mit mehr Vorwissen, deutet darauf hin, dass die Lernenden mit geringerem Vorwissen die Informationen des Feedbacks nicht nutzen und die Aufgaben ohne weitere externe Informationen nicht lösen können. Die Feedbacknutzung lässt auf geringe Kompetenzen bzw. Strategien zur Feedbacknutzung bzw. das fehlende Verständnis für die Verarbeitung des Feedbacks schließen (Jonsson & Panadero, 2018; van der Kleij & Lipnevich, 2020). Darüber hinaus müssen Schüler*innen gewillt sein, sich mit dem Feedback auseinanderzusetzen (van der Kleij, 2020), was bei einem Laborsetting, wie es in dieser Studie umgesetzt wurde, nicht unbedingt zu erwarten war, da den Lernenden konkrete Ziele fehlten. Dass positive Einstellungen gegenüber digitalen Medien zu einer längeren Nutzung eines durch eine digitale Lernplattform präsentiertes Feedback, führen kann, erscheint als ein intuitiv erklärbares Ergebnis. So lässt sich vermuten, dass Lernende, die digitale Medien gerne nutzen, sich auch intensiver mit der Lernplattform und den angebotenen Komponenten, wie dem Feedback, auseinandersetzen. Wie die Ergebnisse außerdem zeigen, führt die Anzahl an positivem Feedback zu einer Verminderung der Nutzung der Hilfe „Lösung anzeigen“, wobei von einem wechselseitigen Zusammenhang auszugehen ist und Lernende, denen es aufgrund ihrer Fähigkeiten möglich ist, die Aufgabe korrekt zu bearbeiten, positives Feedback erhalten und nicht auf vorgegebene Lösungen zurückgreifen müssen.

Forschungsfrage 3: Mediiert die Feedbackwahrnehmung den Effekt von Feedback auf die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen?

Hypothese 3: Das Feedback wirkt sich indirekt über die Feedbackwahrnehmung auf die Bruchrechenleistung (Mzp 2) der Lernenden aus.

Zentrale Ergebnisse: Hypothese 3 lässt sich nicht durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigen. Zwar zeigen sich keine direkten oder indirekten Effekte des Feedbacks über die Feedbackwahrnehmung auf die Bruchrechenleistung, allerdings lässt sich die Bruchrechenleistung durch das wahrgenommene Kompetenzerleben sowie die wahrgenommene konstruktive Unterstützung erklären. So führt ein positiv wahrgenommenes Kompetenzerleben zu höherem konzeptuellem Wissen und eine bessere wahrgenommene konstruktive Unterstützung zu höherem prozeduralem Wissen zur Bruchrechnung. Unter Betrachtung der beiden EG zeigt sich, dass die Lernenden der EG 1 mit zunehmender positiv wahrgenommener Verstehensunterstützung und konstruktiven Unterstützung mehr prozedurales Wissen zu Mzp 2 aufweisen, während die Lernenden der EG 2 nur durch die positivere konstruktive Unterstützung mehr prozedurales Wissen erlangen. Mit zunehmender wahrgenommener Verstehensunterstützung sinkt das prozedurale Wissen jedoch.

Neben der Feedbackwahrnehmung erklärt vor allem das Vorwissen zur Bruchrechnung die Ergebnisse im Bruchrechentests zu Mzp 2. Wobei gezeigt wird, dass das Vorwissen zum konzeptuellen Wissen zur Bruchrechnung sowohl das konzeptuelle als auch das prozedurale Wissen vorhersagt, während das prozedurale Vorwissen nur auf das prozedurale Wissen nach der Intervention wirkt.

Hypothese 3.1: Das Feedback wirkt sich indirekt über die Feedbackwahrnehmung auf die Motivation und Emotionen der Lernenden aus.

Zentrale Ergebnisse: Hinsichtlich der vorliegenden Daten und Ergebnisse lässt sich Hypothese 3.1 nicht bestätigen. Das Feedback wirkt sich nicht indirekt über die Feedbackwahrnehmung auf Motivation und Emotionen von Lernenden aus. Allerdings zeigen sich direkte Effekte der Feedbackwahrnehmung auf die Motivation und Emotionen. Dabei scheint mit einer positiven wahrgenommenen Verstehensunterstützung sowie konstruktiven Unterstützung eine erhöhte intrinsische Motivation einherzugehen. Das situative Interesse und die Belastung werden unter anderem durch das wahrgenommene Kompetenzerleben sowie die konstruktive Unterstützung beeinflusst. Es zeigte sich: Mit steigender wahrgenommener Kompetenzunterstützung erhöht sich auch das situative Interesse der Lernenden sowie die Belastung. Außerdem geht mit einer

positiveren Wahrnehmung der konstruktiven Unterstützung ein höheres situatives Interesse und eine verringerte Belastung einher.

Erklärungen der Ergebnisse hinsichtlich Forschungsfrage 3:

Bruchrechenleistung (H. 3). Die vorliegenden Ergebnisse widersprechen in Teilen bisherigen Studienergebnissen. So deuten beispielsweise die Ergebnisse einer Co²Ca-Teilstudie auf die Mediatorrolle der wahrgenommenen Nützlichkeit des Feedbacks auf die mathematische Leistung von Schüler*innen hin (z. B. Harks et al., 2013; Rakoczy et al., 2019). Allerdings zeigt sich auch für diese Studie ein direkter Einfluss der Feedbackwahrnehmung auf die Mathematikleistung. Wieso allerdings die spezifischen Subskalen der Feedbackwahrnehmung das konzeptuelle und prozedurale Wissen zur Bruchrechnung beeinflussen, kann durch diese Arbeit nicht beantwortet werden.

Wie außerdem gezeigt wurde, beeinflusst das konzeptuelle Vorwissen sowohl das konzeptuelle als auch das prozedurale Wissen zur Bruchrechnung. Dieses Ergebnis zum Einfluss des Vorwissens auf die Bruchrechenleistung lässt sich in die Diskussion um den Zusammenhang konzeptuellen und prozeduralen Wissens einordnen, in der argumentiert wird, dass Lernenden die Anwendung von Rechenregeln (= prozedurales Wissen) leichter fällt, wenn diese über ausreichend konzeptuelles Wissen verfügen (Grouws & Cebulla, 2000; Marzano et al., 2000).

Motivation und Emotionen (H. 3.1). Im Allgemeinen bestätigen die vorliegenden Ergebnisse die Notwendigkeit einer positiver Wahrnehmung von Feedback zur Ausbildung hoher Motivation und lernförderlicher Emotionen. Wieso aber beispielsweise mit erhöhter positiver Feedbackwahrnehmung auch die Belastung steigt, kann nicht geklärt werden. Allerdings sind wissenschaftliche Abhandlungen zum Einfluss von Feedback auf Motivation und Emotionen von einem heterogenen Diskurs geprägt (Henderlong & Lepper; Kuklick & Lindner, 2023; Wisniewski et al., 2020). So kann Feedback auf Lernende beispielsweise durchaus motivierend wirken, dies hängt jedoch von verschiedenen Faktoren ab. Elaboriertes negatives Feedback soll z. B. weniger demotivierend wirken im Vergleich zu einfachem negativem Feedback (Fong et al., 2019). Auch MTF soll aufgrund der Tatsache, dass Lernende das Feedback unmittelbar umsetzen können, positiv auf die Motivation und Emotionen wirken (Huth, 2004). Allerdings legt die wiederholte Konfrontation mit einer Aufgabe, die mit den eigenen Fähigkeiten nicht zu lösen scheint, als Grund für verminderte Motivation und negative Emotionen nahe.

Forschungsfrage 4: (Inwiefern) Beeinflusst die Feedbacknutzung die Bruchrechenleistung sowie die Motivation und Emotionen?

Hypothese 4: Je mehr das Feedback durch die Lernenden genutzt wird, desto höher fällt ihre Bruchrechenleistung (Mzp 2) aus.

Zentrales Ergebnis: Die Nutzung einfachen Feedbacks hat keinen Einfluss auf die Bruchrechenleistung.

Hinsichtlich der Nutzung elaborierten Feedbacks verhalten sich die Ergebnisse konträr zu Hypothese 4. Je mehr das Feedback genutzt wird, desto geringer fallen das Gesamtergebnis sowie das konzeptuelle Wissen zur Bruchrechnung aus. Auf das prozedurale Wissen zur Bruchrechnung hat die Feedbacknutzung keinen signifikanten Einfluss. Bezogen auf dieses Ergebnis wurde vermutet, dass der negative Einfluss der Feedbacknutzung auf die Bruchrechenleistung vor allem durch die Bruchrechenleistung zu Mzp 1 erklärbar ist, also Lernende mit geringerem Vorwissen zur Bruchrechnung das Feedback häufiger nutzen und die schlechtere Bruchrechenleistung eben durch das geringere Vorwissen bedingt sind. Ein Hinweis auf diese Vermutung liefert das Verschwinden der Effekte der Feedbacknutzung unter Einbezug des Vorwissens. Grafische Darstellungen bestätigen, dass Lernende mit geringem Vorwissen zur Bruchrechnung mit zunehmender Nutzungsdauer schlechtere Bruchrechenleistung aufweisen. Für Lernende mit höherem Vorwissen lässt sich kein signifikanter moderierender Effekt des Vorwissens auf den Zusammenhang von der Feedbacknutzung und der Bruchrechenleistung (Mzp 2) feststellen.

Hypothese 4.1: Mit unterschiedlicher Feedbacknutzung geht auch eine unterschiedliche Ausprägung von Motivation und Emotionen einher.

Zentrales Ergebnis: Analog zu Forschungsfrage und Hypothese 4 hat die Nutzung einfachen Feedbacks keinen Einfluss auf die Motivation und Emotionen von Lernenden.

Für die EG 2 lassen sich Hinweise auf Hypothese 4.1 finden. Je länger Lernende elaboriertes Feedback nutzen, desto höher fällt ihre intrinsische Motivation sowie ihr situatives Interesse aus. Auch eine höhere Bruchrechenleistung steigert die intrinsische Motivation und das situative Interesse. Außerdem gilt: Lernende fühlen sich umso belasteter, je häufiger sie das Feedback nutzen. Allerdings verschwindet der Effekt unter Einbezug des Vorwissens zur Bruchrechnung.

Erklärungen der Ergebnisse hinsichtlich Forschungsfrage 4:

Bruchrechenleistung (H. 4). Dass Lernende mit mehr Vorwissen von der Feedbacknutzung profitieren und Lernende mit geringem Vorwissen mit zunehmender Feedbacknutzung schlechter werden, erscheint zunächst konträr zum bisherigen Forschungsdiskurs (Fyfe, 2012; Fyfe & Rittle-Johnson, 2016). So sollen Lernende mit hohem Vorwissen tendenziell von verzögertem und weniger komplexem Feedback profitieren (Morrison et al., 1995; Fyfe & Rittle-Johnson, 2016) und Lernende mit wenig Vorwissen sich die zusätzlichen Informationen elaborierten Feedbacks zu Nutzen machen (Smits et al., 2008). Allerdings wird im Zusammenhang von Feedback immer wieder der „cognitive load“ thematisiert (z. B. Sweller et al., 2011). So kann es sein, dass sich die Lernenden mit geringerem Vorwissen durch das elaborierte Feedback überfordert fühlen und eine häufigere Nutzung mehr kognitive Ressourcen zur Verarbeitung des Feedbacks beansprucht werden, wodurch eine Konzentration auf die Aufgabenbearbeitung erschwert wird. Für die vorliegende Stichprobe könnte gelten: Die Lernenden mit wenig Vorwissen sind von der Menge an Informationen des elaborierten Feedbacks überfordert und können dieses nicht umsetzen. Die Lernenden mit mehr Vorwissen können jedoch durch ihre Fähigkeiten das Feedback besser in kognitive Schemata einarbeiten und profitieren daher davon.

Motivation und Emotionen (H. 4.1). Hinsichtlich des positiven Zusammenhangs zwischen der Nutzung von Feedback und der intrinsischen Motivation sowie dem situativen Interesse lässt sich vermuten, dass Lernende, die häufiger mit dem Feedback interagieren, allgemein positivere Einstellungen aufweisen und daher auch ihre Motivation und Emotionen positiver ausfallen. Außerdem wurde gezeigt, dass sich Lernende mit mehr Vorwissen zur Bruchrechnung weniger belastet fühlen. Diesbezüglich lässt sich vermuten, dass Lernende mit geringerem Vorwissen das Feedback mehr nutzen und sich durch die Menge an Informationen, die sie aufgrund ihres geringen Vorwissens nicht in ihre kognitiven Schemata einbinden können und dadurch die Aufgaben nicht korrekt bearbeiten können, belasteter fühlen.

2 Implikationen

Wird Feedback als wichtiger Einflussfaktor auf den Lernerfolg anerkannt und Lernerfolg als die Förderung (mathematischer) Leistung sowie die Steigerung der Motivation und Ausbildung positiver Emotionen verstanden, so können auf Grundlage theoretischer Erkenntnisse und ausgehend von den vorliegenden Ergebnissen potenzielle Implikationen für den (Fach)Unterricht formuliert werden. Hinsichtlich möglicher konkreter Hinweise zur Gestaltung von Unterricht

ausgehend von den vorliegenden Studienergebnissen soll noch einmal betont werden, dass die Studie ein Themengebiet aufgegriffen hat, das den Lernenden bereits bekannt war. Die Ergebnisse sind demnach vor allem auf Übungsphasen, bzw. Selbstlernphasen anzuwenden.

Zunächst sollen die Erkenntnisse zur Förderung der mathematischen (Bruchrechen)Leistung und ganz im Speziellen des konzeptuellen und prozeduralen Wissens aufgegriffen werden:

- Das Arbeiten mit einer Lernplattform im Allgemeinen und das Feedback dieser Lernplattform im Speziellen kann sowohl konzeptuelles als auch prozedurales Wissen zur Bruchrechnung von Lernenden fördern. Tendenziell erweist sich elaboriertes Feedback dabei als lernförderlicher, auch wenn die Unterschiede zum einfachen Feedback nicht signifikant erscheinen. Das Ergebnis, dass digitale Lernplattformen Potenziale zur Präsentation verschiedener Feedbackarten und zur Förderung mathematischer Leistung aufweisen, erscheint besonders aufgrund beschränkter zeitlicher Ressourcen von Lehrkräften als gewinnbringend. Digitale Lernangebote sollten daher als Möglichkeit zur Unterstützung von Lehr-Lern-Prozessen anerkannt werden.
- Es wurde außerdem festgestellt, dass Lernende mit geringem Vorwissen nicht von der Feedbacknutzung, hinsichtlich vermeintlicher Verstehensprozesse (= konzeptuelles Wissen), profitieren. Lernende mit weniger Vorwissen benötigen demnach neben dem Feedback einer digitalen Lernplattform weitere Unterstützung durch beispielsweise die (Fach)Lehrkraft, um eigene Fehler zu durchdringen und Verständnis für den mathematischen Inhalt aufzubauen.
- Ausgehend von den erlangten Erkenntnissen gilt es eine Sensibilität von schulischen Akteur*innen dafür zu schaffen, dass Feedback (auf digitalen Lernplattformen) nicht „per se“ zu einem Anstieg der Leistung führt und Lernende trotz aktiver Nutzung nicht zwangsläufig von dem Feedback profitieren, da die Lernenden beispielsweise eventuell Probleme beim Verarbeiten der Feedbackinformationen haben.

Neben der Adaption schulischer Lehr-Lern-Prozesse zum Zweck der Leistungssteigerung von Schüler*innen gilt es auch auf Grundlage empirischer Erkenntnisse den Unterricht so weit zu adaptieren, dass die Motivation sowie Emotionen gefördert werden:

- Es gilt ein Bewusstsein für die Möglichkeit zur Veränderung von Motivation und Emotionen durch Feedback zu schaffen. Dabei sollte eine Sensibilität dafür geschaffen werden, dass Feedback die Motivation sowie positive Emotionen fördern kann. Allerdings

kann Feedback auch zu einer Verminderung der Motivation und dem Hervorrufen negativer Emotionen führen, was vermutlich durch wiederholtes Scheitern hervorgerufen wird. Vor allem Lernende mit negativen Emotionen (z. B. Angst) gegenüber dem Fach Mathematik sollten daher nicht mit einem Zuviel an Informationen konfrontiert werden, da diese Lernenden das Feedback ansonsten als negativ wahrnehmen und die Wahrnehmung als signifikanter Prädiktor der Motivation und Emotionen herausgestellt wurde.

- Auch bezüglich der Motivation und Emotionen sollten sich die individuellen Bedürfnisse der Lernenden bewusst gemacht werden. So legen die Ergebnisse nahe, dass vor allem Lernende mit höherem Vorwissen von elaboriertem Feedback hinsichtlich einer gesteigerten Motivation und einem höheren situativen Interesse profitieren. Lernende mit geringem Vorwissen sollten demnach vorsichtig an Feedbackinformationen herangeführt werden und zusätzliche Unterstützung erhalten, damit diese sich von dem Feedback nicht überfordert fühlen.

3 Kritische Reflektion

Die Schlüsse dieser Arbeit beruhen auf quantitativen Ergebnissen, die sowohl auf theoretischer Ebene sowie empirischer Seite weitreichende Annahmen über die Wirksamkeit von Feedback bestätigen. Bezogen auf die Ergebnisse scheint eine kritische Reflektion verschiedener Aspekte wie der Durchführung der Studie, den Testinstrumenten sowie der Auswertung unabdingbar. Einschränkungen bezüglich der Verallgemeinerbarkeit sowie Interpretierbarkeit der Ergebnisse sollten sich bewusst gemacht werden. Besonders in Bezug auf die Verallgemeinerbarkeit gilt zu beachten, dass die Aussagen anhand einer begrenzten Anzahl an Schüler*innen²⁷ einer Jahrgangsstufe getroffen sowie einer einzelnen Lernplattform und eines einzigen mathematischen Themenfelds in das Studiendesign eingebunden wurden. Die Studie kann daher keinen generellen Anspruch auf Repräsentativität und Generalisierbarkeit erheben.

Kritische Diskussion des Studiendesigns:

- Aufgrund fehlenden schriftlichen Feedbacks in schulischen Lehr-Lern-Situationen im Allgemeinen sowie Selbstlernphasen im Speziellen wurde das Potenzial des automatisierten Feedbacks von digitalen Lernplattformen herausgestellt. Hinsichtlich dieses Potenzials zeigen die Analysen, dass sich die Bruchrechenleistung der Lernenden nach der Intervention verbesserten. Dabei kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass eine

²⁷ Wie bereits in Abschnitt C, Kapitel 3 dieser Arbeit besprochen, erscheint die Stichprobengröße für einen Teil der Analysen als zu gering. Die pandemische Lage erschwerte die Rekrutierung teilnehmender Schule jedoch ungenügend und bedingte eine Vielzahl an Krankheitsausfällen.

Leistungsverbesserung auf eine reine Aufgabenbearbeitung, die auch analog möglich wäre, zurückzuführen ist.

- Theoretische Vorüberlegungen gehen von einer Überlegenheit elaborierten Feedbacks im Vergleich zu einfachem Feedback wie KR bezüglich des Einflusses auf die (Bruchrechen)Leistung von Lernenden aus, wobei diese Aussage nicht generalisiert werden kann. Die Analysen dieser Arbeit weisen zwar in der Tendenz eine bessere Leistung der Lernenden, die elaboriertes Feedback erhielten, auf, signifikant wurden die Ergebnisse jedoch nicht. In Verbindung mit einer Studie von Cheung und Slavin (2013) deutet dies auf die Notwendigkeit einer längeren Intervention hin.
- Ebenfalls ausgehend von theoretischen und empirischen Erkenntnissen scheint die Relevanz der Feedbackwahrnehmung und -nutzung durchaus belegt. Allerdings werden in diesem Zusammenhang auch Forschungsdesiderate herausgestellt, da die Lernendenperspektive lange vernachlässigt wurde und das Feld der digitalen Lernplattformen im Allgemeinen und demnach auch die Nutzung digital-gestützten Feedbacks im Speziellen aus wissenschaftlicher Sicht noch sehr jung ist. Aus den eben genannten Gründen wurde sich für einen Fokus auf eben die Feedbackwahrnehmung und -nutzung in einem digital-gestützten Lernsetting entschieden. Mit dieser Fokussierung geht jedoch der Verlust weiterer möglicher Determinanten (z. B. cognitive load) bezüglich des Einflusses von Feedback einher (z. B. Mertens et al., 2022; Lysakowski, 1982; Sweller et al., 2011).

Kritische Diskussion der Testinstrumente:

- Bei allen Fragebogenskalen handelt es sich um bereits erprobte Items, die ggf. dem Zweck der Studie angepasst wurden. Allerdings weisen die Items der Variablen zu digitalen Medien unzureichende Reliabilitäts- und Trennschärfewerte auf. Da diese Variablen jedoch als mögliche signifikante Prädiktoren angesehen wurden, wurden sie nicht aus den Analysen ausgeschlossen.
- Bei der Erfassung der Wahrnehmung des Feedbacks handelt es sich um bereits erprobte Skalen, die durchaus gute Reliabilitätswerte aufweisen. Als problematisch bei der Erfassung der Feedbackwahrnehmung speziell für die Stichprobe stellt sich jedoch heraus, dass die Lernplattform und das Arbeiten mit dieser den Lernenden bereits bekannt war. Zwar wurde während der Durchführung der Befragung darauf hingewiesen, dass sich die Lernenden auf die aktuellen Erfahrungen beziehen sollen. Es kann jedoch nicht aus-

geschlossen werden, dass sich die Schüler*innen auf Vorerfahrungen mit der Lernplattform bezogen haben. Sollte dies der Fall sein, könnten die vermuteten Gruppenunterschiede hinsichtlich der Feedbackwahrnehmung verfälscht worden sein.

- Die Feedbackpolung wurde nur für Lernende, die mit elaboriertem Feedback arbeiteten, erfasst, da dies anfangs nur für diese EG relevant erschien. Es scheint im Nachhinein allerdings ebenfalls lohnenswert zu erforschen, inwiefern der Anteil von positivem und negativem Feedback Einfluss darauf hatte, dass die Proband*innen der EG 1 falsch gelöste Aufgaben erneut berechnet haben (als Operationalisierung der Feedbacknutzung der EG 1).
- Zur Erfassung der Nutzung elaborierten Feedbacks stellten sich in vorangegangenen Arbeiten die Dauer und Häufigkeit auf dem Feedback als passende Indikatoren heraus (z. B. Reinhold et al., 2020). Die Dauer und Häufigkeit auf Feedback können jedoch nur als Indikatoren für die Feedbacknutzung unter der Definition des Abrufens von Informationen gesehen werden. Inwiefern das Feedback tatsächlich gelesen und zur Anpassung der eigenen Lösung genutzt wurde, schließen die Indikatoren nicht mit ein. Dazu wären andere (qualitative) methodische Zugänge, wie z. B. Eye-Tracking, Interviews oder lautes Denken erforderlich.

Kritische Diskussion der Auswertungsmethoden:

- Wenn mehrere Gruppenvergleiche (t-Tests) an derselben Stichprobe zur Überprüfung von Hypothesen durchgeführt werden, entsteht das Problem des multiplen Testens, bzw. das Risiko der α -Fehler-Kumulierung. Jeder einzelne t-Test birgt eine gewisse Irrtumswahrscheinlichkeit die Nullhypothese fälschlicherweise abzulehnen (α -Fehler). Mit zunehmender Anzahl an Tests an derselben Stichprobe steigt die kumulierte Irrtumswahrscheinlichkeit. Es gilt also: Je mehr Gruppenvergleiche durchgeführt werden, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine oder mehr Nullhypothesen fälschlicherweise abgelehnt werden (Eid et al., 2013). Auch für die vorliegende Stichprobe wurden mehrere Gruppenvergleiche in Form von t-Tests durchgeführt. Da die Gruppenvergleiche nur selten signifikante Ergebnisse lieferten, die Nullhypothesen also nicht abgelehnt wurden, wurde darauf verzichtet auf eine mögliche α -Fehler-Kumulierung (z. B. durch die Bonferroni-Korrektur) zu reagieren.

4 Ausblick

Trotz der vorangegangenen diskutierten Limitationen unter anderem bezüglich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf schulische Lehr-Lern-Prozesse im Allgemeinen leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Optimierung von Feedbackprozessen insbesondere im Rahmen digital-gestützter Selbstlernphasen im Fach Mathematik und kann Lehrkräfte darin unterstützen, zu verstehen, wie Lernende mit Lernplattformen interagieren und welche Rolle Lehrkräfte in diesem Prozess einnehmen. Es lässt sich festhalten: (1) Digitale Lernplattformen und das implementierte Feedback verfügen über das Potenzial sowohl das Verstehen (= konzeptuelles Wissen) als auch Rechenregeln (= prozedurales Wissen) von Lernenden zu fördern. (2) Die Feedbackwahrnehmung sowie (3) die Feedbacknutzung spielen bei der effektiven Förderung der Leistung sowie der Motivation und Emotionen eine relevante Rolle, die es genauer zu untersuchen gilt. Durch den Vergleich zweier Feedbackarten bereitgestellt von einer digitalen Lernplattform, konnten wichtige Erkenntnisse bezüglich der Rolle von Feedback im Lernprozess sowie dem Umgang mit Feedback generiert werden. Dabei spiegelt die eine Feedbackart (KR) ein „typisches“ Feedback innerhalb alltäglicher Lehr-Lern-Situationen und die andere Feedbackart (elaboriertes Feedback) lernförderliches Feedback durch die Implementation zusätzlicher Informationen wider. Aufgrund der Ergebnisse lässt sich vermuten, dass das Potenzial von Feedback auf digitalen Lernplattformen nicht vollumfänglich ausgeschöpft wird. Möglicherweise können unterrichtliche Übungsphasen zum richtigen Umgang mit Feedback dessen Wirksamkeit auf den Lernerfolg erhöhen. Aufgabe zukünftiger Studien sollte die konkrete Entwicklung und Evaluierung solcher Übungsphasen sein. Dabei könnten Anschlussstudien der zentralen Frage nachgehen, ob Lernende durch solche Übungsphasen Feedback anders, im besten Fall positiver wahrnehmen und befähigt werden, dieses Feedback effektiver zu nutzen. Damit schließt sich diese Arbeit der allgemeinen Forderung nach tiefergehenden Forschungsarbeiten nicht nur zur Frage, wann Feedback tatsächlich als lernwirksam erscheint, sondern ganz explizit welche Feedbackart für welche Schüler*innen mit spezifischen Eigenschaften am wirksamsten ist, an.

Auch erwiesen sich nicht alle Wahrnehmungsvariablen als relevant bezüglich der Förderung des Lernerfolgs. Qualitative Studien könnten diesbezüglich einen tieferen Einblick in die Gedanken der Lernenden und ihre Gründe für eben jene Wahrnehmung ermöglichen. Ein besonderer Fokus sollte dabei auf der Analyse elaborierten Feedbacks liegen, dessen Ausschöpfung des Potenzials noch weiterer Klärung bedarf. So besteht weiterhin die Frage nach dem Nutzen sowie den Kosten (z. B. durch einen erhöhten „cognitive load“) elaborierten Feedbacks. Ein Fokus sollte dabei auf denen durch die Lernplattform angebotenen Hilfen als ein Teil von Feedback gelegt werden. Bezüglich solcher Hilfen gilt es in weiteren Studien zu klären, wie diese

effektiv gestaltet werden können. Dabei drängen sich Fragen nach der optimalen Länge, den benötigten Informationen sowie der Anzahl an Hilfen auf. Außerdem wäre eine Auseinandersetzung mit weiteren möglichen Einflussfaktoren (wie z. B. der Zielorientierung) auf die Feedbackeffektivität und -nutzung durch weitere Studien wünschenswert. So liefert die vorliegende Studie eine Vielzahl an Anknüpfungspunkten für weitere quantitative sowie qualitative Untersuchungen, um letztendlich Lehr-Lern-Prozesse durch den effektiven Einsatz von Feedback zu optimieren.

Literaturverzeichnis

- Aiken, L. & West, S. G. (1991). *Multiple regression: Testing and interpreting interactions*. SAGE Publications.
- Aleven, V., Roll, I. D., McLaren, B. M. & Koedinger, K. R. (2010). Automated, Unobtrusive, Action-by-Action Assessment of Self-Regulation During Learning With an Intelligent Tutoring System. *Educational Psychologist*, 45(4), 224–233. <https://doi.org/10.1080/00461520.2010.517740>
- Aliasgari, M., Riahinia, N. & Mojdehavar, F. (2010). Computer-assisted instruction and student attitudes towards learning mathematics. *Education, Business and Society: Contemporary Middle Eastern Issues*, 3(1), 6–14. <https://doi.org/10.1108/17537981011022779>
- Altenburger, L. & Besser, M. (2023). Potenziale digitaler Lernplattformen im Mathematikunterricht hinsichtlich der Förderung prozeduralen und konzeptuellen Wissens zur Bruchrechnung – ein möglicher Zugang zur fachdidaktischen Analyse am konkreten Beispiel. In M. Ahlers, M. Besser, C. Herzog & P. Kuhl (Hrsg.), *Digital-gestütztes Üben im Fachunterricht: Aktuelle Entwicklungen, Gegenstände und Prozesse* (34–54). Beltz Verlagsgesellschaft.
- Anderson, J. R., Boyle, C. F. & Reiser, B. J. (1985). Intelligent Tutoring Systems. *Science*, 456–462.
- Anderson, R. H., Kulhavy, R. W. & Andre, T. (1972). Conditions under which feedback facilitates learning from programmed lessons. *Journal of Educational Psychology*, 63, 186–188.
- Andrade, H. L. & Cizek, G. J. (2010). *Handbook of formative assessment*. Routledge.
- Attali, Y. & van der Kleij, F. M. (2017). Effects of feedback elaboration and feedback timing during computer-based practice in mathematics problem solving. *Computers & Education*, 110, 154–169. <https://doi.org/10.1016/J.COMPEDU.2017.03.012>
- Azevedo, R. & Bernard, R. M. (1995). A Meta-Analysis of the Effects of Feedback in Computer-Based Instruction. *Journal of Educational Computing Research*, 13(2), 111–127. <https://doi.org/10.2190/9LMD-3U28-3A0G-FTQT>
- Bailey, D. H., Hoard, M. K., Nugent, L. & Geary, D. C. (2012). Competence with fractions predicts gains in mathematics achievement. *Journal of experimental child psychology*, 113(3), 447–455. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.06.004>
- Bailey, D. H., Siegler, R. S. & Geary, D. C. (2014). Early predictors of middle school fraction knowledge. *Developmental science*, 17(5), 775–785. <https://doi.org/10.1111/desc.12155>
- Balt, M. & Herzog, M. (2023). Förderung bei Matheangst. In M. Börnert-Ringleb, G. Casale, M. Balt & M. Herzog (Hrsg.), *Lern- und Verhaltensschwierigkeiten in der Schule:: Erscheinungsformen - Entwicklungsmodelle - Implikationen für die Praxis* (S. 196–205). Kohlhammer Verlag.
- Bangert-Drowns, R. L., Kulik, C.-L. C., Kulik, J. A. & Morgan, M. (1991). The Instructional Effect of Feedback in Test-Like Events. *Review of Educational Research*, 61(2), 213–238. <https://doi.org/10.3102/00346543061002213>
- Barzel, B. & Klinger, M. (2022). Digitale Mathematikwerkzeuge. In G. Pinkernell, F. Reinhold, F. Schacht & D. Walter (Hrsg.), *Digitales Lehren und Lernen von Mathematik in der Schule: Aktuelle Forschungsbefunde im Überblick* (S. 91–108). Springer Berlin Heidelberg; Springer Spektrum.

- Barzel, B., Leuders, T., Prediger, S. & Hußmann, S. (2013). Designing tasks for engaging students in active knowledge organization. In C. Margolinas (Vorsitz), *Task Design in Mathematics Education.: Proceedings of ICMI Study 22*.
- Baumert, J., Blum, W., Brunner, M., Dubberke, T., Jordan, A., Klusmann, U., Krauss, S., Kunter, M., Löwen, K., Neubrand, M. & Tsai, Y.-M. (2008). *Professionswissen von Lehrkräften, kognitiv aktivierender Mathematikunterricht und die Entwicklung von mathematischer Kompetenz (COACTIV): Dokumentation der Erhebungsinstrumente. Materialien aus der Bildungsforschung: Nr. 83*. Max-Planck-Inst. für Bildungsforschung. <http://hdl.handle.net/hdl:11858/00-001M-0000-0023-998B-4>
- Baumgartner, P. & Payr, S. (1999). *Lernen mit Software (2. Aufl.). Lernen mit interaktiven Medien: Bd. 1*. Studien-Verl.
- Beal, C. R., Arroyo, I. M., Cohen, P. R. & Woolf, B. P. (2010). Evaluation of AnimalWatch:: An intelligent tutoring system for arithmetic an fraction. *Journal of Interactive Online Learning*, 9(1), 64–77.
- Behr, M. J., Harel, G., Post, T. R. & Lesh, R. (1992). Rational Number, Ratio, and Proportion. In D. A. Grouws (Hrsg.), *Handbook of Research on Mathematics Teaching and Learning* (296–333). Macmillan.
- Behr, M. J., Wachsmuth, I., Post, T. R. & Lesh, R. (1984). Order and Equivalence of Rational Numbers: A Clinical Teaching Experiment. *Journal for Research in Mathematics Education*, 15(5), 323–341. <https://doi.org/10.2307/748423>
- Benkert, S. (2001). *Wissensvermittlung mit neuen Medien: Untersuchungen am Beispiel Niedrigenergie- und Solararchitektur* [Dissertation]. Universität-Gesamthochschule, Siegen.
- Bergmann, M. & Franzese, F. (2020). Fehlende Werte. In M. Tausendpfund (Hrsg.), *Fortgeschrittene Analyseverfahren in den Sozialwissenschaften* (S. 165–204). Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Berkovits, I., Hancock, G. R. & Nevitt, J. (2000). Bootstrap Resampling Approaches for Repeated Measure Designs: Relative Robustness to Sphericity and Normality Violations. *Educational and Psychological Measurement*, 60(6), 877–892. <https://doi.org/10.1177/00131640021970961>
- Bertelsmann Stiftung (Hrsg.). (2015). *Individuell fördern mit digitalen Medien: Chancen, Risiken, Erfolgsfaktoren*. Bertelsmann Stiftung.
- Bettermarks GmbH. (2023). *bettermarks: Erfolgreich Mathe Lernen*. <https://de.bettermarks.com/produkt/>
- Biffi, C. (2002). Lernsoftware - Qualitätsmassstäbe, Angebot, Nutzung und Evaluation. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 5(Lernsoftware), 1–22. <https://doi.org/10.21240/mpaed/05/2002.05.08.X>
- Black, P. & Wiliam, D. (1998). Assessment and Classroom Learning. *Assessment in Education: Principles, Policy & Practice*, 5(1), 7–74. <https://doi.org/10.1080/0969595980050102>
- Black, P. & Wiliam, D. (2009). Developing the theory of formative assessment. *Educational Assessment, Evaluation and Accountability*, 21(1), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s11092-008-9068-5>
- Bonham, S. W., Deardorff, D. L. & Beichner, R. J. (2003). Comparison of student performance using web and paper-based homework in college-level physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(10), 1050–1071. <https://doi.org/10.1002/tea.10120>

- Booth, J. L. & Newton, K. J. (2012). Fractions: Could they really be the gatekeeper's doorman? *Contemporary Educational Psychology*, 37(4), 247–253. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2012.07.001>
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler: Mit ... 163 Tabellen* (7., vollst. überarb. und erw. Aufl.). *Springer-Lehrbuch*. Springer.
- Bos, W., Wendt, H., Ünlü, A., Valtin, R., Euen, B., Kasper, D. & Tarelli, I. (2012). Leistungsprofile von Viertklässlerinnen und Viertklässlern in Deutschland. In W. Bos, H. Wendt, O. Köller & C. Selzer (Hrsg.), *TIMSS 2011: Mathematische und naturwissenschaftliche Kompetenzen von Grundschulkindern in Deutschland im internationalen Vergleich* (269-301). Waxmann.
- Böwing-Schmalenbrock, M. & Jurczok, A. (2011). *Multiple Imputation in der Praxis: Ein sozialwissenschaftliches Anwendungsbeispiel*. https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/deliver/index/docId/4847/file/multiple_imputation.pdf
- Brackbill, Y. & Kappy, M. S. (1962). Delay of reinforcement and retention. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 55(1), 14–18.
- Brainerd, C. J. & Gordon, L. L. (1994). Development of verbatim and gist memory for numbers. *Developmental Psychology*, 30(2), 163–177. <https://doi.org/10.1037//0012-1649.30.2.163>
- Breiter, A., Welling, S. & Stolpmann, B. E. (2010). *Medienkompetenz in der Schule: Integration von Medien in den weiterführenden Schulen in Nordrhein-Westfalen. Schriftenreihe Medienforschung der LfM: Bd. 64*. Vistas Verl. http://lfmpublikationen.lfm-nrw.de/modules/pdf_download.php?products_id=237
- Brown, G. & Quinn, R. J. (2006). Algebra students' difficulty with fractions:: An error analysis. *Australian Mathematics Teacher*, 62(4), 28–40.
- Brownell, W. A. (1947). The Place of Meaning in the Teaching of Arithmetic. *The Elementary School Journal*, 47(5), 256–265. <https://doi.org/10.1086/462322>
- Bruder, R. (2008). Üben mit Konzept. *Mathematik lehren*(147), 4–11.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.). (2016). *Bildungsoffensive für die digitale Wissensgesellschaft: Strategie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung*. Die Bundesregierung. (August 2014). *Digitale Agenda 2014 – 2017*.
- Bürgermeister, A., Kampa, M., Rakoczy, K., Harks, B., Besser, M., Klieme, E., Blum, W. & Leiss, D. (2011). *Dokumentation der Befragungsinstrumente des Laborexperimentes im Projekt "Conditions and Consequences of Classroom Assessment" (Co²CA)*.
- Bürgermeister, A. & Saalbach, H. (2018). Theoretischer Beitrag: Formatives Assessment: Ein Ansatz zur Förderung individueller Lernprozesse. *Psychologie in Erziehung und Unterricht*, 65(3), 194–205. <https://doi.org/10.2378/peu2018.art11d>
- Burns, M. K., Klingbeil, D. A. & Ysseldyke, J. (2010). The effects of technology-enhanced formative evaluation on student performance on state accountability math tests. *Psychology in the Schools*, 47(6), 582–591. <https://doi.org/10.1002/pits.20492>
- Burrow, M., Evdorides, H., Hallam, B. & Freer-Hewish, R. (2005). Developing formative assessments for postgraduate students in engineering. *European Journal of Engineering Education*, 30, 255–263.
- Butler, D. L. & Winne, P. H. (1995). Feedback and Self-Regulated Learning: A Theoretical Synthesis. *Review of Educational Research*, 3(65), 245–281.
- Byrnes, J. P. & Wasik, B. A. (1991). Role of conceptual knowledge in mathematical procedural learning. *Developmental Psychology*(27), 777–786.

- Carpenter, T. P., Corbitt, M., Kepner, H., Lindquist, M. & Reys, R. (1980). Results of the second NAEP mathematics assessment: Secondary school. *Mathematics Teacher*(73), 329–338.
- Chase, P. A., Hilliard, L. J., Geldhof, G. J., Warren, D. J. A. & Lerner, R. M. (2014). Academic achievement in the high school years: the changing role of school engagement. *Journal of youth and adolescence*, 43(6), 884–896. <https://doi.org/10.1007/s10964-013-0085-4>
- Chatterjee, S. & Price, B. (1991). *Regression Diagnostics*. John Wiley.
- Cheon, S. H., Reeve, J., Lee, Y., Ntoumanis, N., Gillet, N., Kim, B. R. & Song, Y.-G. (2019). Expanding autonomy psychological need states from two (satisfaction, frustration) to three (dissatisfaction): A classroom-based intervention study. *Journal of Educational Psychology*, 111(4), 685–702. <https://doi.org/10.1037/edu0000306>
- Cheung, A. C. & Slavin, R. E. (2013). The effectiveness of educational technology applications for enhancing mathematics achievement in K-12 classrooms: A meta-analysis. *Educational Research Review*, 9, 88–113. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2013.01.001>
- Chih-En, K. (1992). *Instructional Media Selection: Interactive Effects of Timing of Feedback and Learners' Prior Knowledge on the Achievement and Retention of a Computer-based Mathematical Task*. University of Southern California.
- Christenson, S. L., Reschly, A. L. & Wylie, C. (Hrsg.). (2012). *Handbook of Research on Student Engagement*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2018-7>
- Cizek, G. J., Rachor, R. A. & Fitzgerald, S. M. (1996). Teachers' Assessment Practices: Preparation, Isolation, and the Kitchen Sink. *Educational Assessment*, 3(2), 159–179. https://doi.org/10.1207/s15326977ea0302_3
- Clariana, R. B., Wagner, D. & Roher Murphy, L. C. (2000). Applying a connectionist description of feedback timing. *Educational Technology Research and Development*, 48(3), 5–22. <https://doi.org/10.1007/BF02319855>
- Cohen, J., Cohen, P., West, S. G. & Aiken, L. (2003). *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences, 3rd Edition* (3rd edition). Lawrence Erlbaum.
- Corbett, A. T. & Anderson, J. R. (2001). Locus of feedback control in computer-based tutoring. In J. Jacko & A. Sears (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI ,01* (S. 245–252). ACM Press. <https://doi.org/10.1145/365024.365111>
- Craik, K. (1943). *The nature of explanation*. Cambridge University Press.
- Cramer, K. A., Post, T. R. & delMas, R. C. (2002). Initial Fraction Learning by Fourth- and Fifth-Grade Students: A Comparison of the Effects of Using Commercial Curricula with the Effects of Using the Rational Number Project Curriculum. *Journal for Research in Mathematics Education*, 33(2), 111. <https://doi.org/10.2307/749646>
- Daniela, L. & Rudolfa, A. (2019). “Learning platforms: how to make the right choice“. In L. Daniela (Hrsg.), *Didactics of Smart Pedagogy Smart Pedagogy for Technology Enhanced Learning* (S. 191–209). Springer International Publishing.
- Dawson, J. *Interpreting interaction effects*.
- Deci, E. & Ryan, R. M. (Hrsg.). (2004). *Handbook of self-determination research*. University of Rochester Press.
- Dempsey, J. V., Driscoll, M. P. & Swindell, L. K. (1993). Text-based feedback. In J. V. Dempsey & Sales G. C. (Hrsg.), *Interactive Instruction and feedback* (S. 21–54). Educational Technology Publications.
- Dewey, J. (1913). *Interest and effort in education*. Riverside Press.

- DeWolf, M., Grounds, M. A., Bassok, M. & Holyoak, K. J. (2014). Magnitude comparison with different types of rational numbers. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 40(1), 71–82. <https://doi.org/10.1037/a0032916>
- Dihoff, R. E., Brosvic, G. M., Epstein, M. L. & Cook, M. J. Provision of feedback during preparation for academic testing: Learning is enhanced by immediate but not delayed feedback. *The Psychological Record*, 54(2), 207–231.
- Dilling, F. & Pielsticker, F. (2020). *Mathematische Lehr-Lernprozesse im Kontext digitaler Medien: Empirische Zugänge und theoretische Perspektiven* (1st ed. 2020). MINTUS – Beiträge zur mathematisch-naturwissenschaftlichen Bildung. Springer Fachmedien Wiesbaden; Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-31996-0>
- Dillon, A. & Gabbard, R. (1998). Hypermedia as an Educational Technology: A Review of the Quantitative Research Literature on Learner Comprehension, Control, and Style. *Review of Educational Research*, 68(3), 322–349. <https://doi.org/10.3102/00346543068003322>
- Döring, N. & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (5., vollst. überarb., akt. u. erw. Aufl. 2016). Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg.
- Dresel, M. & Haugwitz, M. (2008). A Computer-Based Approach to Fostering Motivation and Self-Regulated Learning. *The Journal of Experimental Education*, 77(1), 3–20. <https://doi.org/10.3200/JEXE.77.1.3-20>
- Drew, S. (2001). Perceptions of What Helps Learn and Develop in Education. *Teaching in Higher Education*, 6(3), 309–331. <https://doi.org/10.1080/13562510120061197>
- Drijvers, P. H. M. (2016). *Evidence for benefit? Reviewing empirical research on the use of digital tools in mathematics education*. Zugriff am 25.07.2023 unter <https://dspace.library.uu.nl/handle/>
- Dümbgen, L. (2010). *Biometrie. Studienbücher Medizinische Informatik*. Vieweg + Teubner.
- Dunn, K. & Mulvenon, S. W. (März 2009). A Critical Review of Research on Formative Assessment: The Limited Scientific Evidence of the Impact of Formative Assessment in Education. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 2009(Volume 14 Number 7).
- Duss, K. (2020). *Formative Assessment and Feedback Tool: Design and Evaluation of a Web-based Application to Foster Student Performance* (1st ed. 2020). BestMasters. Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Gabler.
- Efron, B. (1979). Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7(1), 1–26. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552>
- Eichelmann, A., Narciss, S., Schnaubert, L. & Melis, E. (2012). Typische Fehler bei der Addition und Subtraktion von Brüchen – Ein Review zu empirischen Fehleranalysen. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 33(1), 29–57. <https://doi.org/10.1007/s13138-011-0031-5>
- Eickelmann, B., Bos, W. & Laubusch, A. (2019). Kapitel I Die Studie ICILS 2018 im Überblick – Zentrale Ergebnisse und mögliche Entwicklungsperspektiven. In B. Eickelmann, W. Bos, J. Gerick, F. Goldhammer, H. Schaumburg, K. Schwippert, M. Senkbeil & J. Vahrenhold (Hrsg.), *ICILS 2018 #Deutschland: Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern im zweiten internationalen Vergleich und Kompetenzen im Bereich Computational Thinking* (S. 7–32). Waxmann.
- Eid, M., Gollwitzer, M. & Schmitt, M. (2013). *Statistik und Forschungsmethoden* (3., korrigierte Auflage). Beltz.

- Elawar, M. C. & Corno, L. (1985). A factorial experiment in teachers' written feedback on student homework: Changing teacher behavior a little rather than a lot. *Journal of Educational Psychology*, 77(2), 162–173. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.77.2.162>
- Ellington, A. J. (2003). A Meta-Analysis of the Effects of Calculators on Students' Achievement and Attitude Levels in Precollege Mathematics Classes. *Journal for Research in Mathematics Education*, 34(5), 433. <https://doi.org/10.2307/30034795>
- Enderle, T. M. (2015). *Zum Einfluss von Transformationen schiefer Verteilungen auf die Analyse mit imputierten Daten* [Dissertation]. Lehrstuhl für Wirtschafts- und Sozialstatistik im Fachbereich IV der Universität Trier.
- Euler, D. & Holz, H. (Hrsg.). (1992). *Reihe Multimediales Lernen in der Berufsbildung: Bd. 3. Didaktik des computerunterstützten Lernens: Praktische Gestaltung und theoretische Grundlagen* (1. Aufl.). BW Bildung-und-Wiss.-Verl.
- Faber, J. M., Luyten, H. & Visscher, A. J. (2017). The effects of a digital formative assessment tool on mathematics achievement and student motivation: Results of a randomized experiment. *Computers & Education*, 106, 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.12.001>
- Faßler, M. (1997). *Was ist Kommunikation? Uni-Taschenbücher. 1960. Soziologie, Medien- und Kommunikationwissenschaften: 1960: Soziologie, Medien- und Kommunikationswissenschaften*. Fink.
- Fend, H. (1988). *Qualität im Bildungssystem*. Juventa.
- Fend, H. (2009). *Neue Theorie der Schule*. VS Verlag für Sozialwissenschaften. <https://doi.org/10.1007/978-3-531-91788-7>
- Finn, J. D. & Zimmer, K. S. (2012). Student engagement: What is it? Why does it matter? In S. L. Christenson, A. L. Reschly & C. Wylie (Hrsg.), *Handbook of Research on Student Engagement* (S. 97–131). Springer US.
- Fischbein, E. (1989). Tacit Models and Mathematical Reasoning. *For the Learning of Mathematics*, 9(2), 9–14.
- Fischer, C. (2017). *Pädagogischer Mehrwert? Digitale Medien in Schule und Unterricht*. Waxmann Verlag.
- Fong, C. J., Patall, E. A., Vasquez, A. C. & Stautberg, S. (2019). A Meta-Analysis of Negative Feedback on Intrinsic Motivation. *Educational Psychology Review*, 31(1), 121–162. <https://doi.org/10.1007/s10648-018-9446-6>
- Fong, C. J. & Schallert, D. L. (2023). "Feedback to the future": Advancing motivational and emotional perspectives in feedback research. *Educational Psychologist*, 58(3), 146–161. <https://doi.org/10.1080/00461520.2022.2134135>
- Fritz, M. S., Taylor, A. B. & Mackinnon, D. P. (2012). Explanation of Two Anomalous Results in Statistical Mediation Analysis. *Multivariate behavioral research*, 47(1), 61–87. <https://doi.org/10.1080/00273171.2012.640596>
- Fyfe, E. R. (2012). *The Effects of Feedback During Exploratory Mathematics Problem Solving: Prior Knowledge Matters* [Master Thesis]. Graduate School of Vanderbilt University, Nashville Tennessee.
- Fyfe, E. R. & Rittle-Johnson, B. (2016). Feedback Both Helps and Hinders Learning: The Causal Role of Prior Knowledge. *Journal of Educational Psychology*(Vol 108 No 1), 82–97.
- Gabriel, F., Coché, F., Szucs, D., Carette, V., Rey, B. & Content, A. (2013). A componential view of children's difficulties in learning fractions. *Frontiers in psychology*, 4, 715. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00715>

- Gäde, J. C., Schermelleh-Engel, Karin & Werner, Christina S. (2020). Klassische Methoden der Reliabilitätsschätzung. In H. Moosbrugger & A. Kelava (Hrsg.), *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion* (305-334). Springer Berlin Heidelberg.
- Gao, Shuang & Zhang, Xiangkui (2016). A meta-analysis on effects of praise on children's intrinsic motivation. *Advances in Psychological Science*, 24(9), 1358–1367. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2016.01358>
- Gelman, R. & Williams, E. M. (1998). Enabling constraints for cognitive development and learning: domain specificity and epigenesis. In Kuhn, D. & R. S. Siegler (Hrsg.), *Handbook of Child Psychology: Cognition, Perception, and Language*. John Wiley.
- Goebbels, S. & Ritter, S. (2011). *Mathematik verstehen und anwenden – von den Grundlagen bis zu Fourier-Reihen und Laplace-Transformation*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57394-5>
- Graesser, A., Hu, X. & Sottolare, R. (2018). Intelligent tutoring systems. In F. Fischer, C. E. Hmelo-Silver, S. R. Goldman & P. Reimann (Hrsg.), *International Handbook of the Learning Sciences* (S. 246–255). Routledge.
- Grotjahn, R. (Hrsg.). (2002). *Der C-Test. Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen* (4. Aufl.). AKS-Verlag.
- Grotjahn, R. & Kleppin, K. (2017). Feedback zu schriftlichen Lernerproduktionen. In B. Akukwe, R. Grotjahn & S. Schipolowski (Hrsg.), *Schreibkompetenzen in der Fremdsprache: Aufgabengestaltung, kriterienorientierte Bewertung und Feedback* (S. 255–291).
- Grouws, D. A. & Cebulla, K. J. (2000). *Improving student achievement in mathematics*.
- Haapasalo, L. & Kadijevich, D. (2000). Two Types of Mathematical Knowledge and Their Relation. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 21(2), 139–157. <https://doi.org/10.1007/BF03338914>
- Hallett, D., Nunes, T. & Bryant, P. (2010). Individual differences in conceptual and procedural knowledge when learning fractions. *Journal of Educational Psychology*, 102(2), 395–406. <https://doi.org/10.1037/a0017486>
- Harks, B., Rakoczy, K., Hattie, J., Besser, M. & Klieme, E. (2013). The effects of feedback on achievement, interest and self-evaluation: the role of feedback's perceived usefulness. *Educational Psychology*, 34(3), 269–290. <https://doi.org/10.1080/01443410.2013.785384>
- Harrass, N. (2007). *Computereinsatz im Arithmetikunterricht der Grundschule: Theoretische Grundlegung und empirische Forschung zum Üben mit Lernsoftware. Texte zur mathematischen Forschung und Lehre: Bd. 56*. Franzbecker.
- Hart, K. (1989). *Children's Mathematical Frameworks 8-13: A Study of Classroom Teaching*. NERF-Nelson.
- Hasemann, K. (1981). On difficulties with fractions. *Educational Studies in Mathematics*, 12(1), 71–87. <https://doi.org/10.1007/BF00386047>
- Hattie, J. (1999). *Influences on student learning*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:146709940>
- Hattie, J. (2009). *Visible learning: A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement*. Routledge.
- Hattie, J. & Timperley, H. (2007). The Power of Feedback. *Review of Educational Research*, 77(1), 81–112. <https://doi.org/10.3102/003465430298487>
- Hattie, J. & Zierer, K. (2018). *Visible Learning: Auf den Punkt gebracht*. Schneider Verlag Hohengehren GmbH.

- Havnes, A., Smith, K., Dysthe, O. & Ludvigsen, K. (2012). Formative assessment and feedback: Making learning visible. *Studies in Educational Evaluation*, 38(1), 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2012.04.001>
- Hayes, A. F. (2018). *Introduction to mediation, moderation, and conditional process analysis: A regression-based approach* (2 ed.). *Methodology in the social sciences: 2018: 1*. The Guilford Press.
- Hecht, S. A. (1998). Toward an information-processing account of individual differences in fraction skills. *Journal of Educational Psychology*, 90(3), 545–559. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.90.3.545>
- Hecht, S. A., Close, L. & Santisi, M. (2003). Sources of individual differences in fraction skills. *Journal of experimental child psychology*, 86(4), 277–302. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2003.08.003>
- Hecht, S. A. & Vagi, K. J. (2010). Sources of Group and Individual Differences in Emerging Fraction Skills. *Journal of Educational Psychology*, 102(4), 843–859. <https://doi.org/10.1037/a0019824>
- Heckler, A. F. & Mikula, B. D. (2016). Factors affecting learning of vector math from computer-based practice:: Feedback complexity and prior knowledge. *Physics Education Research*(12).
- Hefendehl-Hebeker, L. (1996). Brüche haben viele Gesichter. *Mathematik lehren*(78), 20–48.
- Hefendehl-Hebeker, L., vom Hofe, R., Büchter, A., Humenberger, H., Schulz, A. & Wartha, S. (2019). Subject-Matter Didactics. In L. Hefendehl-Hebeker & H. N. Jahnke (Hrsg.), *Traditions in German-Speaking Mathematics Educations Research* (25-59). Springer.
- Heinen, R. & Kerres, M. (2017). Teil 2: Individuelle Förderung mit digitalen Medien: Handlungsfelder für die systematische, lernförderliche Integration digitaler Medien in Schule und Unterricht. In Bertelsmann Stiftung (Hrsg.), *Individuell fördern mit digitalen Medien: Chancen, Risiken, Erfolgsfaktoren* (2. Auflage). Verlag Bertelsmann Stiftung.
- Heller, K. A. & Perleth, C. (2000). *Kognitiver Fähigkeitstest für 4. bis 12. Klassen, Revision* (1. Aufl.). BeltzTest.
- Helmke, A. (2015). *Unterrichtsqualität und Lehrerprofessionalität: Diagnose, Evaluation und Verbesserung des Unterrichts* (6. überarbeitete Auflage). Klett/Kallmeyer.
- Hemmerich, W. (2015). *StatistikGuru: Cohen's d berechnen*. <https://statistikguru.de/rechner/cohens-d.html>
- Hemmerich, W. (2016). *StatistikGuru: Statistische Power (Teststärke)*. <https://statistikguru.de/lexikon/statistische-power.html>
- Hemmerich, W. (2020a). *StatistikGuru: Cohen's d für den gepaarten t-Test berechnen*. <https://statistikguru.de/rechner/cohens-d-gepaarter-t-test.html>
- Hemmerich, W. (2020b). *StatistikGuru.: Johnson-Neyman-Plots erstellen*. <https://statistikguru.de/rechner/johnson-neyman-plots-erstellen.html>
- Henderlong, J. & Lepper, M. R. (2002). The effects of praise on children's intrinsic motivation: a review and synthesis. *Psychological Bulletin*, 128(5), 774–795. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.128.5.774>
- Heusinger, M. (2022). *Lernprozesse digital unterstützen: Ein Methodenbuch für den Unterricht* (2. Auflage). *Pädagogik*. Beltz.
- Heymann, H. W. (2005). Was macht Üben „intelligent“. *Pädagogik*, 6–11.
- Hiebert, J. & Lefevre, P. (1986). Conceptual and procedural knowledge in mathematics: An introductory analysis. In J. Hiebert (Hrsg.), *Conceptual and procedural knowledge: The case of mathematics* (S. 1–27). Erlbaum.

- Higgins, R., Hartley, P. & Skelton, A. (2001). Getting the Message Across: The problem of communicating assessment feedback. *Teaching in Higher Education*, 6(2), 269–274. <https://doi.org/10.1080/13562510120045230>
- Hillmayr, D., Reinhold, F., Ziernwald, L. & Reiss, K. (2017). *Digitale Medien im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufe: Einsatzmöglichkeiten, Umsetzung und Wirksamkeit*. Waxmann. <https://www.waxmann.com/?eID=texte&pdf=3766Volltext.pdf&typ=zusatztext>
- Hillmayr, D., Ziernwald, L., Reinhold, F., Hofer, S. I. & Reiss, K. (2020). The potential of digital tools to enhance mathematics and science learning in secondary schools: A context-specific meta-analysis. *Computers & Education*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103897>
- Hilz, A., Guill, K., Roloff, J., Aldrup, K. & Köller, O. (2023). The relationship between individual characteristics and practice behaviour within an adaptive arithmetic learning program. *Journal of Computer Assisted Learning*, 39(3), 970–983. <https://doi.org/10.1111/jcal.12780>
- Holmes, K. & Papageorgiou, G. (2009). Good, bad and insufficient: Students' expectations, perceptions and uses of feedback. *The Journal of Hospitality Leisure Sport and Tourism*, 8(1), 85–96. <https://doi.org/10.3794/johlste.81.183>
- Holmes, W., Anastopoulou, S., Schaumburg, H. & Mavrikis, M. (2018). *Personalisiertes Lernen mit digitalen Medien: Ein roter Faden*. Robert Bosch Stiftung.
- Holodynski, M. & Oerter, R. (2008). Tätigkeitsregulation und die Entwicklung von Motivation, Emotion, Volition. In R. Oerter (Hrsg.), *Lehrbuch. Entwicklungspsychologie* (6., vollst. überarb. Aufl., S. 535–570). Beltz.
- Huang, B., Hew, K. F. & Lo, C. K. (2019). Investigating the effects of gamification-enhanced flipped learning on undergraduate students' behavioral and cognitive engagement. *Interactive Learning Environments*, 27(8), 1106–1126. <https://doi.org/10.1080/10494820.2018.1495653>
- IBM. (2022). *Downloading IBM SPSS Statistics 28*.
- Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen. *Seidenstraße*. <https://www.iqb.hu-berlin.de/apps/src/taskpool/data/taskpools/getTaskFile?id=p82^seidenstrasse^f12089>
- Ischebeck, A., Schocke, M. & Delazer, M. (2009). The processing and representation of fractions within the brain: an fMRI investigation. *NeuroImage*, 47(1), 403–413. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.03.041>
- Jacobs, B. (2008). Was wissen wir über die Lernwirksamkeit von Aufgabenstellungen und Feedback. In J. Thonhauser (Hrsg.), *Aufgaben als Katalysatoren von Lernprozessen. Eine zentrale Komponente organisierten Lehrens und Lernens aus der Sicht von Lernforschung, Allgemeiner Didaktik und Fachdidaktik* (S. 99–114). Waxmann.
- Jacobs, C. & Petermann, F. (2012). *Diagnostik von Rechenstörungen* (2., überarb. u. erw. Aufl.). *Kompendien Psychologische Diagnostik: Bd. 7*. Hogrefe Verlag.
- Jaehnig, W. & Miller, M. L. (2007). Feedback Types in Programmed Instruction: A Systematic Review. *The Psychological Record*, 57(2), 219–232. <https://doi.org/10.1007/BF03395573>
- James, W. (1984). What is an Emotion? *Mind*, 9(34), Artikel 188–205.
- Jerram, H., Glynn, T. & Tuck, B. (1988). Responding to the Message: providing a social context for children learning to write. *Educational Psychology*, 8(1-2), 31–40. <https://doi.org/10.1080/0144341880080104>

- Johnson, P. O. & Neyman, J. (1963). Tests of certain linear hypotheses and their application to some educational problems. *Statistical Research Memoirs*(1), 57–93.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models*. Cambridge University Press.
- Jonsson, A. (2013). Facilitating productive use of feedback in higher education. *Active Learning in Higher Education*, 14(1), 63–76. <https://doi.org/10.1177/1469787412467125>
- Jonsson, A. & Panadero, E. (2018). Facilitating Students' Active Engagement with Feedback. In A. A. Lipnevich & J. K. Smith (Hrsg.), *Cambridge Handbooks in Psychology. The Cambridge Handbook of Instructional Feedback* (S. 531–553). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316832134.026>
- Jordan, N. C., Hansen, N., Fuchs, L. S., Siegler, R. S., Gersten, R. & Micklos, D. (2013). Developmental predictors of fraction concepts and procedures. *Journal of experimental child psychology*, 116(1), 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.02.001>
- Junco, R. & Clem, C. (2015). Predicting course outcomes with digital textbook usage data. *The Internet and Higher Education*, 27, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2015.06.001>
- Kalyuga, S. (2007). Expertise Reversal Effect and Its Implications for Learner-Tailored Instruction. *Educational Psychologist*(19), 509-539.
- Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P. & Sweller, J. (2003). The Expertise Reversal Effect. *Educational Psychologist*(38 : 1), 23-31. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_4
- Kerres, M. (2018). Mediendidaktik: Konzeption und Entwicklung digitaler Lernangebote. In *De Gruyter Studium. EBOOK PACKAGE Engineering, Computer Sciences 2017: EBOOK PACKAGE COMPLETE 2018: EBOOK PACKAGE Engineering, Computer Sciences 2018*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110456837>
- Kingston, N. & Nash, B. (2011). Formative Assessment: A Meta-Analysis and a Call for Research. *Educational Measurement: Issues and Practice*, 30(4), 28–37. <https://doi.org/10.1111/j.1745-3992.2011.00220.x>
- Kippel, G. M. (1974). Information feedback schedules, interpolated activities, and retention. *Journal of Psychology*, 87, 245–251.
- Kleinginna, P. R. & Kleinginna, A. M. (1981). A categorized list of emotion definitions, with suggestions for a consensual definition. *Motivation and Emotion*, 5(4), 345–379. <https://doi.org/10.1007/BF00992553>
- Klingberg, L. (1974). *Einführung in die allgemeine Didaktik: Vorlesungen*. Volk und Wissen.
- Kluger, A. N. & DeNisi, A. (1996). The effects of feedback interventions on performance: A historical review, a meta-analysis, and a preliminary feedback intervention theory. *Psychological Bulletin*, 119(2), 254–284. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.119.2.254>
- Koedinger, K. R. & Aleven, V. (2007). Exploring the Assistance Dilemma in Experiments with Cognitive Tutors. *Educational Psychology Review*, 19(3), 239–264. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9049-0>
- Kohler, B. & Wacker, A. (2013). Das Angebots-Nutzungs-Modell: Überlegungen zu Chancen und Grenzen des derzeit prominentesten Wirkmodells der Schul- und Unterrichtsforschung. *Die Deutsche Schule (DDS)*, 105(3), 241-257.
- Kollhoff, S. (2021). *Analyse von Transferprozessen in der Entwicklung des Bruchzahlbegriffs: Theoretische Rahmung und empirische Untersuchung* (1. Auflage 2021). Bielefelder Schriften zur Didaktik der Mathematik: Bd. 6. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Spektrum.

- Komorek, E. (2006). *Mit Hausaufgaben Problemlösen und eigenverantwortliches Lernen in der Sekundarstufe I fördern: Entwicklung und Evaluation eines Ausbildungsprogramms für Mathematiklehrkräfte*. Logos-Verl.
- Kopp, J. & Lois, D. (2012). *Sozialwissenschaftliche Datenanalyse: Eine Einführung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften. <https://doi.org/10.1007/978-3-531-93258-3>
- Krause, U.-M., Stark, R. & Mandl, H. (2009). The effects of cooperative learning and feedback on e-learning in statistics. *Learning and Instruction*, 19(2), 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2008.03.003>
- Krauthausen, G. (2012). *Digitale Medien im Mathematikunterricht der Grundschule. Mathematik Primarstufe und Sekundarstufe*. Spektrum Akademischer Verlag.
- Krauthausen, G. (2018). *Einführung in die Mathematikdidaktik - Grundschule* (4. Auflage). *Mathematik Primarstufe und Sekundarstufe I + II*. Springer Spektrum.
- Krotz, F. (2007). *Mediatisierung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Krumm, S., Schmidt-Atzert, L. & Amelang, M. (2021). Grundlagen diagnostischer Verfahren. In L. Schmidt-Atzert, S. Krumm & M. Amelang (Hrsg.), *Psychologische Diagnostik* (6th ed. 2021, 39-208). Springer Berlin Heidelberg; Springer.
- Kuhn, J., Ropohl, M. & Groß, J. (2017). Fachdidaktische Mehrwerte durch Einführung digitaler Werkzeuge. In J. Meßinger-Koppelt, S. Schanze & J. Groß (Hrsg.), *Lernprozesse mit digitalen Werkzeugen unterstützen: Perspektiven aus der Didaktik naturwissenschaftlicher Fächer* (S. 11–18). Joachim Herz Stiftung.
- Kuklick, L. & Lindner, M. A. (2023). Affective-motivational effects of performance feedback in computer-based assessment: Does error message complexity matter? *Contemporary Educational Psychology*, 73, 102146. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2022.102146>
- Kulhavy, R. W. & Stock, W. A. (1989). Feedback in written instruction: The place of response certitude. *Educational Psychology Review*, 1(4), 279-308. <https://doi.org/10.1007/BF01320096>
- Kulhavy, R. W., White, M. T., Topp, B. W., Chan, A. L. & Adams, J. (1985). Feedback complexity and corrective efficiency, 10(3).
- Kulik, J. A. & Fletcher, J. D. (2015). Effectiveness of Intelligent Tutoring Systems: A Meta-Analytic Review. *Review of Educational Research*, 86(1), 42–78. <https://doi.org/10.3102/0034654315581420>
- Kulik, J. A. & Kulik, C.-L. C. (1988). Timing of Feedback and Verbal Learning. *Review of Educational Research*, 58(1), 79–97. <https://doi.org/10.3102/00346543058001079>
- Kultusministerkonferenz. (2017, 7. Dezember). *Bildung in der digitalen Welt: Strategie der Kultusministerkonferenz*.
- Kyaruzi, F., Strijbos, J.-W., Ufer, S. & Brown, G. T. L. (2019). Students' formative assessment perceptions, feedback use and mathematics performance in secondary schools in Tanzania. *Assessment in Education: Principles, Policy & Practice*, 26(3), 278–302. <https://doi.org/10.1080/0969594X.2019.1593103>
- Lachner, A., Scheiter, K. & Stürmer, K. (2020). Digitalisierung und Lernen mit digitalen Medien als Gegenstand der Lehrerinnen- und Lehrerbildung. In Cramer, C., J. König, M. Rothland & S. Blömeke (Hrsg.), *Handbuch Lehrerinnen- und Lehrerbildung*. Verlag Julius Klinkhardt. <https://doi.org/10.35468/hblb2020-007>
- Leighton, J. P. (2019). Students' Interpretation of Formative Assessment Feedback: Three Claims for Why We Know So Little About Something So Important. *Journal of Educational Measurement*, 56(4), 793–814. <https://doi.org/10.1111/jedm.12237>

- Lenz, K., Dreher, A., Holzäpfel, L. & Wittmann, G. (2019a). Are conceptual knowledge and procedural knowledge empirically separable? The case of fractions. *The British journal of educational psychology*, 90(3), 809–829. <https://doi.org/10.1111/bjep.12333>
- Lenz, K., Dreher, A., Holzäpfel, L. & Wittmann, G. (2019b). *Two Types of Fraction Knowledge? -: an Empirical Study Focusing on the Serparability of Conceptual an Procedural Knowledge*. University of Education Freiburg.
- Lerche, T. (2019). Üben. In E. Kiel, B. Herzig, U. Maier & U. Sandfuchs (Hrsg.), *Handbuch Unterrichten an allgemeinbildenden Schulen* (1. Auflage, S. 212–220). UTB; Klinkhardt.
- Leuders, T. (2014). Entdeckendes Lernen - Produktives Üben. In H. Linneweber-Lammerskiten (Hrsg.), *Lehren lernen. Fachdidaktik Mathematik: Grundbildung und Kompetenzaufbau im Unterricht der Sek. I und II* (1. Auflage, S. 236–263). Klett/Kallmeyer.
- Leutner, D. (2002). Adaptivität und Adaptierbarkeit multimedialer Lehr- und Informationssysteme. In L. J. Issing (Hrsg.), *Information und Lernen mit Multimedia und Internet: Lehrbuch für Studium und Praxis* (3. Aufl., S. 115–126). Beltz.
- Lewis, M. W. & Anderson, J. R. (1985). Discrimination of operator schemata in problem solving: Learning from examples. *Cognitive Psychology*, 17, 26–65.
- Li, Q. & Ma, X. (2010). A Meta-analysis of the Effects of Computer Technology on School Students' Mathematics Learning. *Educational Psychology Review*, 22(3), 215–243. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9125-8>
- Lin, C.-Y., Becker, J., Byun, M.-R., Yang, D.-C. & Huang, T.-W. (2013). Preservice Teachers' Conceptual and Procedural Knowledge of Fraction Operations: A Comparative Study of the U nited S tates and T aiwan. *School Science and Mathematics*, 113(1), 41–51. <https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.2012.00173.x>
- Lipnevich, A. A. & Panadero, E. (2021). A Review of Feedback Models and Theories: Descriptions, Definitions, and Conclusions. *Frontiers in Education*, 6. <https://doi.org/10.3389/feduc.2021.720195>
- Lipnevich, A. A. & Smith, J. K. (2009). Effects of differential feedback on students' examination performance. *Journal of experimental psychology. Applied*, 15(4), 319–333. <https://doi.org/10.1037/a0017841>
- Lipowsky, F. (2006). Auf den Lehrer kommt es an. Empirische Evidenzen für Zusammenhänge zwischen Lehrerkompetenzen, Lehrerhandeln und dem Lernen der Schüler. *Zeitschrift für Pädagogik* (51), 47–70. <https://doi.org/10.25656/01:7370>
- Lortie-Forgues, H., Tian, J. & Siegler, R. S. (2015). Why is learning fraction and decimal arithmetic so difficult? *Developmental Review*, 38, 201–221. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2015.07.008>
- Lui, A. M. & Andrade, H. L. (2022). The Next Black Box of Formative Assessment: A Model of the Internal Mechanisms of Feedback Processing. *Frontiers in Education*, 7, Artikel 751548. <https://doi.org/10.3389/feduc.2022.751548>
- Lysakowski, R. S. & Walberg, H. J. (1982). Instructional Effects of Cues, Participation, and Corrective Feedback: A Quantitative Synthesis. *American Educational Research Journal*, 19(4), 559–578.
- Ma, W., Adesope, O. O., Nesbit, J. C. & Liu, Q. (2014). Intelligent tutoring systems and learning outcomes: A meta-analysis. *Journal of Educational Psychology*, 106(4), 901–918. <https://doi.org/10.1037/a0037123>

- Mackinnon, D. P., Lockwood, C. M. & Williams, J. (2004). Confidence Limits for the Indirect Effect: Distribution of the Product and Resampling Methods. *Multivariate behavioral research*, 39(1), 99–128. https://doi.org/10.1207/s15327906mbr3901_4
- Maier, U., Randler, C. & Wolf, N. (2016). Effekte von computergestützten, formativen Tests mit unterschiedlichen Rückmeldeformaten auf Lernleistungen im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Zeitschrift für Pädagogik*, 62(2), 241–262.
- Malle, G. (2004). Grundvorstellungen zu Bruchzahlen. *Mathematik lehren*, 123, 4–8.
- Mang, J., Ustjanzew, N., Schiepe-Tiska, A., Prenzel, M., Sälzer, C., Müller, K. & Rodríguez, E. G. (2018). *PISA 2012 Skalenhandbuch: Dokumentation der Erhebungsinstrumente*. Waxmann Verlag.
- Marzano, R. J., Gaddy, B. B. & Dean, C. (2000). *What Works in Classroom Instruction*. Mid-Continent Research for Education and Learning.
- Mashkovskaya, A. (2013). *Der C-Test als Lesetest bei Muttersprachlern* [Dissertation]. Universität Duisburg-Essen, Essen.
- Mason, B. J. & Bruning, R. H. (2001). *Providing feedback in computer-based instruction: What the research tells us*. CLASS Reserach Report No. 9. Center for Instructional Innovation, University of Nebraska-Lincoln.
- McBroom, J., Koprinska, I. & Yacef, K. (2021). A Survey of Automated Programming Hint Generation: The HINTS Framework. *ACM Computing Surveys*, 54(8). <https://doi.org/10.1145/3469885>
- Meier, A. (2023). *realmath.de*. <http://www.realmath.de/>
- Mendicino, M., Razzaq, L. & Heffernan, N. T. (2009). A Comparison of Traditional Homework to Computer-Supported Homework. *Journal of Research on Technology in Education*, 41(3), 331–358. <https://doi.org/10.1080/15391523.2009.10782534>
- Mertens, U., Finn, B. & Lindner, M. A. (2022). Effects of computer-based feedback on lower- and higher-order learning outcomes: A network meta-analysis. *Journal of Educational Psychology*, 114(8), 1743–1772. <https://doi.org/10.1037/edu0000764>
- Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein. (2014). *Fachanforderungen Mathematik: Allgemein bildende Schulen Sekundarstufe I Sekundarstufe II*. <https://fachportal.lernnetz.de/sh/fachanforderungen/mathematik.html?file=files/Fachanforderungen%20und%20Leitf%C3%A4den/Sekundarstufe/Fachanforderungen/Fachanforderungen%20Mathematik%20Sekundarstufe%20%282014%29.pdf&cid=16990>
- Mitchell, M. (1993). Situational Interest: Its Multifaceted Structure in the Secondary School Mathematics Classroom. *Journal of Educational Psychology*, 85(3), 424–436.
- Mock, T. (2006). Was ist ein Medium? *Publizistik*, 51(2), 183–200. <https://doi.org/10.1007/s11616-006-0056-9>
- Morrison, G. R., Ross, S. M., Gopalakrishnan, M. & Casey, J. (1995). The Effects of Feedback and Incentives on Achievement in Computer-Based Instruction. *Contemporary Educational Psychology*, 20(1), 32–50. <https://doi.org/10.1006/ceps.1995.1002>
- Mory, E. H. (2003). Feedback research. In D. H. Jonassen (Hrsg.), *Handbook of research on educational communications and technology* (S. 745–783). Macmillan.
- Mory, E. H. (2004). Feedback Research Revisted. In D. H. Jonassen (Hrsg.), *Handbook of research on educational communications and technology* (S. 745–783). Erlbaum.
- Motzer, R. (2018). *Brüche, Verhältnisse und Wurzeln: Grundlagen wiederentdecken und interessante Anwendungen neu kennenlernen*. Springer Fachmedien Wiesbaden.

- Mou, Y., Li, Y., Hoard, M. K., Nugent, L., Chu, F. W., Rouder, J. N. & Geary, D. C. (2016). Developmental Foundations of Children's Fraction Magnitude Knowledge. *Cognitive development*, 39, 141–153. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2016.05.002>
- Mouratidis, A., Lens, W. & Vansteenkiste, M. (2010). How you provide corrective feedback makes a difference: The motivating role of communicating in an autonomy-supporting way. *Journal of sport & exercise psychology*, 32(5), 619–637. <https://doi.org/10.1123/jsep.32.5.619>
- Mullis, I. V. S., Martin, M. O., Foy, P. & Hooper, M. (2016). *TIMSS 2015: International Results in Mathematics*. TIMSS & PIRLS International Study Center.
- Mumm, J. & Mutlu, B. (2011). Human-robot proxemics: Physical and psychological distancing in human-robot interaction. In *Proceedings of the 6th international conference on human-robot interaction* (S. 331–338). <https://doi.org/10.1145/1957656.1957786>
- Narciss, S. (2004). The impact of informative tutoring feedback and self-efficacy on motivation and achievement in concept learning. *Experimental psychology*, 51(3), 214–228. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.51.3.214>
- Narciss, S. (2006). *Informatives tutorielles Feedback: Entwicklungs- und Evaluationsprinzipien auf der Basis instruktionspsychologischer Erkenntnisse*. Pädagogische Psychologie und Entwicklungspsychologie: Bd. 56. Waxmann.
- Narciss, S. (2018). Feedbackstrategien für interaktive Lernaufgaben. In S. Kracht, A. Niedostadek & P. Sensburg (Hrsg.), *Springer Reference Psychologie. Praxishandbuch Professionelle Mediation* (S. 1–24). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54373-3_35-1
- Narciss, S. & Huth, K. (2004). How to design informative tutoring feedback for multi-media learning. In H. M. Niegemann, D. Leutner & R. Brünken (Hrsg.), *Instructional Design for Multimedia learning* (S. 181–195). Waxmann.
- Narciss, S. & Huth, K. (2006). Fostering achievement and motivation with bug-related tutoring feedback in a computer-based training for written subtraction. *Learning and Instruction*, 16(4), 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.07.003>
- Nattland, A. & Kerres, M. (2009). Computerbasierte Methoden im Unterricht [Computer-based Methods in Class]. In K.-H. Arnold, U. Sandfuchs & J. Wiechmann (Hrsg.), *Handbuch Unterricht* (S. 317–324). Julius Klinkhardt.
- Ni, Y. & Zhou, Y.-D. (2005). Teaching and Learning Fraction and Rational Numbers: The Origins and Implications of Whole Number Bias. *Educational Psychologist*, 40(1), 27–52. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4001_3
- Niedersächsisches Kultusministerium. (2021). *Kerncurriculum für die Oberschule Schuljahrgänge 5 – 6: Mathematik*. <https://cuvo.nibis.de/cuvo.php?p=download&upload=345>
- Niedersächsisches Kultusministerium, Regionale Landesämter für Schule und Bildung & Niedersächsisches Landesinstitut für schulische Qualitätsentwicklung. (2023). *Anlage 1 Schulschreiben Digitaler Bildungscontent*. <https://www.mk.niedersachsen.de/download/191983>
- Obersteiner, A. & Tumpek, C. (2015). Measuring fraction comparison strategies with eye-tracking. *ZDM*, 48(3), 255–266. <https://doi.org/10.1007/s11858-015-0742-z>
- Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD). *Global Teaching Insights Technical Report Annex D: TALIS-VIDEO Student-Post-Questionnaire*. <https://www.oecd.org/edu/school/GTI-TechReport-AnnexD2.pdf>
- Özyurt, Ö., Özyurt, H., Güven, B. & Baki, A. (2014). The effects of UZWEBMAT on the probability unit achievement of Turkish eleventh grade students and the reasons for such

- effects. *Computers & Education*, 75, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.02.005>
- Padberg, F. (1986). Über typische Schülerschwierigkeiten in der Bruchrechnung -: Bestandsaufnahme und Konsequenzen. *Der Mathematikunterricht*, 32(3), 58–77.
- Padberg, F. (1995). *Didaktik der Bruchrechnung: Gemeine Brüche - Dezimalbrüche*. Spektrum Akademischer Verlag.
- Padberg, F. & Wartha, S. (2017). *Didaktik der Bruchrechnung* (5. Auflage). *Mathematik Primarstufe und Sekundarstufe I + II*. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52969-0>
- Paige, D. D. (1966). Learning while testing. *Journal of Educational Research*, 59, 276–277.
- Pallack, A. (2018). *Digitale Medien im Mathematikunterricht der Sekundarstufen I + II*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47301-6>
- Peat, M. & Franklin, S. (2002). Supporting student learning: The use of computer-based formative assessment modules. *British Journal of Educational Technology*, 33, 515–523.
- Pekrun, R., vom Hofe, R., Blum, W., Götz, T., Wartha, S. & Jullien, S. (2006). Projekt zur Analyse der Leistungsentwicklung in Mathematik (PALMA): Entwicklungsverläufe, Schülervoraussetzungen und Kontextbedingungen von Mathematikleistungen bei Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I. In M. Prenzel & L. Allolio-Näcke (Hrsg.), *Untersuchungen zur Bildungsqualität von Schule: Abschlussbericht des DFG-Schwerpunktprogramms* (S. 21–53). Waxmann.
- Petko, D. (2020). *Einführung in die Mediendidaktik: Lehren und Lernen mit digitalen Medien* (2. Auflage). *BildungsWissen Lehramt*. Beltz.
- Peugh, J. L. & Enders, C. K. (2004). Missing Data in Educational Research: A Review of Reporting Practices and Suggestions for Improvement. *Review of Educational Research*, 74(4), 525–556. <https://doi.org/10.3102/00346543074004525>
- Phe, G. D. & Andre, T. (1989). Delayed retention effect: Attention, perseveration, or both? *Contemporary Educational Psychology*, 14(2), 173–185.
- Pokorny, H. & Pickford, P. (2010). Complexity, cues and relationships: Student perceptions of feedback. *Active Learning in Higher Education*, 11(1), 21–30. <https://doi.org/10.1177/1469787409355872>
- Postel, H. (1981). Größen- oder Operatorkonzept in der Bruchrechnung? *Der Mathematikunterricht*, 4(27), 16–46.
- Pöysä, S., Vasalampi, K., Muotka, J., Lerkkanen, M.-K., Poikkeus, A.-M. & Nurmi, J.-E. (2018). Variation in situation-specific engagement among lower secondary school students. *Learning and Instruction*, 53, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.07.007>
- Prediger, S. (2009). Inhaltliches Denken vor Kalkül. Ein didaktisches Prinzip zur Vorbeugung und Förderung bei Rechenschwierigkeiten. In A. Fritz & S. Schmidt (Hrsg.), *Fördernder Mathematikunterricht in der Sek. I. Rechenschwierigkeiten erkennen und überwinden* (S. 213–234). Beltz.
- Pressey, S. L. (1926). A simple device which gives tests and scores - and teaches. *School and Society*, 23, 373–376.
- Pridemore, D. R. & Klein, J. D. (1995). Control of Practice and Level of Feedback in Computer-Based Instruction. *Contemporary Educational Psychology*, 20(4), 444–450. <https://doi.org/10.1006/ceps.1995.1030>
- Pross, H. (1972). *Medienforschung: Film, Funk, Presse, Fernsehen. Das Wissen der Gegenwart*. Carl Haber.

- Raithel, J., Dollinger, B. & Hörmann, G. (2009). *Einführung Pädagogik: Begriffe - Strömungen - Klassiker - Fachrichtungen*. Vs Verlag Fur Sozialwisse.
- Rakoczy, K., Klieme, E., Bürgermeister, A. & Harks, B. (2008). The Interplay Between Student Evaluation and Instruction. Grading and feedback in mathematics classrooms. *Zeitschrift für Psychologie*, 216(2), 110–123. <https://doi.org/10.1027/0044-3409.216.2.111>
- Rakoczy, K., Pinger, P., Hochweber, J., Klieme, E., Schütze, B. & Besser, M. (2019). Formative assessment in mathematics: Mediated by feedback's perceived usefulness and students' self-efficacy. *Learning and Instruction*, 60, 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2018.01.004>
- Ramaprasad, A. (1983). On the definition of feedback. *Behavioral Science*, 28(1), 4–13. <https://doi.org/10.1002/bs.3830280103>
- Ramm, G., Prenzel, M., Baumert, J., Blum, W., Lehmann, R., Leutner, D., Neubrand, M., Pekrun, R., Rolff, H.-G., Rost, J. & Schiefele, U. (Hrsg.). (2006). *PISA 2003: Dokumentation der Erhebungsinstrumente*. Waxmann.
- Ramseier, E. & Brühwiler, C. (2003). Herkunft, Leistung und Bildungschancen im gegliederten Bildungssystem. Vertiefte PISA-Analyse unter Einbezug der kognitiven Grundfähigkeiten. *Schweizerische Zeitschrift für Bildungswissenschaften*, 25, 23–58. (*Schweizerische Zeitschrift für Bildungswissenschaften* 25 (2003) 1, S. 23-58).
- Reeve, J. (1996). *Motivating others: Inner motivational resources*. Allyn and Bacon.
- Reinhold, F. (2019). *Wirksamkeit von Tablet-PCs bei der Entwicklung des Bruchzahlbegriffs aus mathematikdidaktischer und psychologischer Perspektive: Eine empirische Studie in Jahrgangsstufe 6. Studien zur theoretischen und empirischen Forschung in der Mathematikdidaktik*. Springer Fachmedien Wiesbaden; Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-23924-4>
- Reinhold, F., Hoch, S., Schiepe-Tiska, A., Strohmaier, A. R. & Reiss, K. (2021). Motivational and Emotional Orientation, Engagement, and Achievement in Mathematics. A Case Study With One Sixth-Grade Classroom Working With an Electronic Textbook on Fractions. *Frontiers in Education*, 6, Artikel 588472. <https://doi.org/10.3389/educ.2021.588472>
- Reinhold, F., Hoch, S., Werner, B., Reiss, K. & Richter-Gebert, J. (2018). *Tablet-PCs im Mathematikunterricht der Klasse 6: Ergebnisse des Forschungsprojektes ALICE:Bruchrechnen*. Waxmann.
- Reinhold, F., Hoch, S., Werner, B., Richter-Gebert, J. & Reiss, K. (2020). Learning fractions with and without educational technology: What matters for high-achieving and low-achieving students? *Learning and Instruction*, 65, 101264. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2019.101264>
- Reisinger, M., Svecnik, E. & Schwetz, H. (2012). *Fehlende Werte und keine Normalverteilung? Tipps und Abhilfen für das quantitativ orientierte Forschen* (1. Aufl.). Facultas Verlags- und Buchhandels AG.
- Ricketts, C. & Wilks, S. J. (2002). Improving student performance through computerbased assessment: Insights from recent research. *Assessment and Evaluation in Higher Education*, 27, 475–479.
- Rieß, M. (2018). *Zum Einfluss digitaler Werkzeuge auf die Konstruktion mathematischen Wissens*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-20644-4>
- Rittle-Johnson, B., Siegler, R. S. & Alibali, M. W. (2001). Developing conceptual understanding and procedural skill in mathematics: An iterative process. *Journal of Educational Psychology*, 93(2), 346–362. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.93.2.346>

- Roche, A. (2010). Decimats: helping students to make sense of decimal place value. *Australian Primary Mathematics Classroom*, 4–10.
- Roper, W. J. (1977). Feedback in computer-assisted instruction. *Programmed Learning and Educational Technology*, 14, 43–49.
- Rosseel, Y. (2012). lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. *Journal of Statistical Software*, 48(2), 1–36.
- Sadler, D. R. (1989). Formative assessment and the design of instructional systems. *Instructional Science*, 18(2), 119–144. <https://doi.org/10.1007/BF00117714>
- Sadler, D. R. (1998). Formative Assessment: revisiting the territory. *Assessment in Education: Principles, Policy & Practice*, 5(1), 77–84. <https://doi.org/10.1080/0969595980050104>
- Sanders, T., Parker, P. D., Del Pozo-Cruz, B., Noetel, M. & Lonsdale, C. (2019). Type of screen time moderates effects on outcomes in 4013 children: evidence from the Longitudinal Study of Australian Children. *The international journal of behavioral nutrition and physical activity*, 16(1), 117. <https://doi.org/10.1186/s12966-019-0881-7>
- Schadl, C. (2020). *Individuelle Lernvoraussetzungen für den Erwerb des Bruchzahlkonzepts: Strukturanalysen und Untersuchung der längsschnittlichen Prädiktivität. Empirische Studien zur Didaktik der Mathematik: Band 38*. Waxmann.
- Scharnagl, S., Evanschitzky, P., Streb, J., Spitzer, M. & Hille, K. (2014). Sixth Graders Benefit from Educational Software when Learning about Fractions: A Controlled Classroom study. *Numeracy*, 7(1). <https://doi.org/10.5038/1936-4660.7.1.4>
- Schaumburg, H. (2017). Teil 1: Chancen und Risiken digitaler Medien in der Schule. In Bertelsmann Stiftung (Hrsg.), *Individuell fördern mit digitalen Medien: Chancen, Risiken, Erfolgsfaktoren* (2. Auflage, S. 20–94). Verlag Bertelsmann Stiftung.
- Schaumburg, H. & Prasse, D. (2019). *Medien und Schule: Theorie - Forschung - Praxis*. Julius Klinkhardt.
- Schendera, C. F. G. (2007). *Datenqualität mit SPSS*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag. <https://doi.org/10.1524/9783486710694>
- Schink, A. (2013). *Flexibler Umgang mit Bruchzahlen*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-00921-2>
- Schlittgen, R. (2009). *Multivariate Statistik. Lehr- und Handbücher der Statistik*. Oldenbourg.
- Schmidt, R. A., Young, D. E., Swinnen, S. & Shapiro, D. C. (1989). Summary Knowledge of Result for Skill Acquisition: Support for the Guidance Hypothesis. *Journal of Experimental Psychology*, 15(2), 352–359.
- Schneider, M. (2006). *Konzeptuelles und prozedurales Wissen als latente Variablen: Ihre Interaktion beim Lernen mit Dezimalbrüchen* [Dissertation]. Technische Universität, Berlin.
- Schneider, M. & Stern, E. (2010). The developmental relations between conceptual and procedural knowledge: a multimethod approach. *Developmental Psychology*, 46(1), 178–192. <https://doi.org/10.1037/a0016701>
- Schroth, M. L. (1992). The effects of delay of feedback on a delayed concept formation transfer task. *Contemporary Educational Psychology*, 17(1), 78–82. [https://doi.org/10.1016/0361-476X\(92\)90048-4](https://doi.org/10.1016/0361-476X(92)90048-4)
- Schulmeister, R. (1997). *Grundlagen hypermedialer Lernsysteme: Theorie - Didaktik - Design*. Oldenbourg Verlag.
- Schulz, A. & Wartha, S. (2021). *Zahlen und Operationen am Übergang Primar-/Sekundarstufe: Grundvorstellungen aufbauen, festigen, vernetzen. Mathematik Primarstufe und Sekundarstufe I + II*. Springer Spektrum.

- Schütze, B., Souvignier, E. & Hasselhorn, M. (2018). Stichwort – Formatives Assessment. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 21(4), 697–715. <https://doi.org/10.1007/s11618-018-0838-7>
- Seidel, T. (2014). Angebots-Nutzungs-Modelle in der Unterrichtspsychologie. Integration von Struktur- und Prozessparadigma. *Zeitschrift für Pädagogik*, 60(6), 850–866. <https://doi.org/10.25656/01:14686>
- Senge, K. (2022). Die Wiederentdeckung der Gefühle. Zur Einleitung. In K. Senge, R. Schützeichel & V. Zink (Hrsg.), *Schlüsselwerke der Emotionssoziologie* (2nd ed. 2022, 1-30). Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer VS.
- Serlo Education. (2023). *Serlo: Die freie Lernplattform*. <https://de.serlo.org/21423/p%C3%A4dagogisches-konzept>
- Sfard, A. (1991). On the dual nature of mathematical conceptions: Reflections on processes and objects as different sides of the same coin. *Educational Studies in Mathematics*, 22(1), 1–36. <https://doi.org/10.1007/BF00302715>
- Shute, V. J. (2008). Focus on Formative Feedback. *Review of Educational Research*, 78(1), 153–189. <https://doi.org/10.3102/0034654307313795>
- Siegler, R. S., Duncan, G. J., Davis-Kean, P. E., Duckworth, K., Claessens, A., Engel, M., Susperreguy, M. I. & Chen, M. (2012). Early predictors of high school mathematics achievement. *Psychological science*, 23(7), 691–697. <https://doi.org/10.1177/0956797612440101>
- Siegler, R. S., Fazio, L. K., Bailey, D. H. & Zhou, X. (2013). Fractions: the new frontier for theories of numerical development. *Trends in cognitive sciences*, 17(1), 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.11.004>
- Siegler, R. S. & Lortie-Forgues, H. (2015). Conceptual knowledge of fraction arithmetic. *Journal of Educational Psychology*, 107(3), 909–918. <https://doi.org/10.1037/edu0000025>
- Siegler, R. S. & Pyke, A. A. (2013). Developmental and individual differences in understanding of fractions. *Developmental Psychology*, 49(10), 1994–2004. <https://doi.org/10.1037/a0031200>
- Siegler, R. S. & Stern, E. (1998). Conscious and unconscious strategy discoveries: a microgenetic analysis. *Journal of experimental psychology. General*, 127(4), 377–397. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.127.4.377>
- Singer, V. & Strasser, K. (2017). The association between arithmetic and reading performance in school: A meta-analytic study. *School psychology quarterly: the official journal of the Division of School Psychology, American Psychological Association*, 32(4), 435–448. <https://doi.org/10.1037/spq0000197>
- Singh, R., Saleem, M., Pradhan, P., Heffernan, C., Heffernan, N. T., Razzaq, L., Dailey, M. D., O'Connor, C. & Mulcahy, C. (2011). Feedback during Web-Based Homework: The Role of Hints. In Biswas, G., S. Bull, J. Kay & A. Mitrovic (Hrsg.), *Artificial Intelligence in Education: AIED 2011. Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 6738, S. 328–336). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21869-9_43
- Skinner, B. F. (1954). The science of learning and the art of teaching. *Harvard Educational Review*, 24, 86–97.
- Sleeman, D. H., Kelly, A. E., Martinak, R., Ward, R. D. & Moore, J. L. (1989). Studies of diagnosis and remediation with high school algebra students. *Cognitive Science*, 13(4), 551–568. [https://doi.org/10.1016/0364-0213\(89\)90023-2](https://doi.org/10.1016/0364-0213(89)90023-2)
- Smits, M. H., Boon, J., Sluijsmans, D. M. & van Gog, T. (2008). Content and timing of feedback in a web-based learning environment:: effects on learning as a function of prior

- knowledge, Interactive Learning Environments. *Interactive Learning Environments*(16:2), 183–193. <https://doi.org/10.1080/10494820701365952>
- solocode GmbH. (2023). *Anton [Computer software]*.
- Steenbergen-Hu, S. & Cooper, H. (2014). A meta-analysis of the effectiveness of intelligent tutoring systems on college students' academic learning. *Journal of Educational Psychology*, 106(2), 331–347. <https://doi.org/10.1037/a0034752>
- Stein, M. (2015). *Eva-CBTM: Evaluation of computer based online training programs for mathematics* (2., enlarged ed.). *Mathematiklernen mit digitalen Medien: Bd. 1*. WTM Verl. für Wiss. Texte und Medien. http://wtm-verlag.de/ebook_download/Stein_Eva_CBTM__ISBN9783942197717.pdf
- Strijbos, J.-W., Narciss, S. & Dünnebier, K. (2010). Peer feedback content and sender's competence level in academic writing revision tasks: Are they critical for feedback perceptions and efficiency? *Learning and Instruction*, 20(4), 291–303. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.08.008>
- Sweller, J., Ayres, P. & Kalyuga, S. (2011). The Redundancy Effect. In J. M. Spector & S. P. Lajoie (Hrsg.), *Cognitive load theory* (S. 141–154). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4_11
- Swertz, C. (2009). Medium und Medientheorien. *Umwelten - Sozialpädagogik, Medienpädagogik, Interkulturelle und Vergleichende Erziehungswissenschaft, Umweltpädagogik, Handbuch der Erziehungswissenschaft*, 751–780. <https://doi.org/10.25656/01:7346>
- Ternès von Hattburg, A. & Schäfer, M. (2020). *Digitalpakt – was nun? Ideen und Konzepte für zukunftsorientiertes Lernen* (1st ed. 2020). Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer VS. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-25530-5>
- Thurm, D. (2020). *Digitale Werkzeuge im Mathematikunterricht integrieren: Zur Rolle von Lehrerzeugungen und der Wirksamkeit von Fortbildungen*. Springer.
- Thurm, D. & Graewert, L. A. (2022). *Digitale Mathematik-Lernplattformen in Deutschland*. Springer.
- Tulis, M. (2010). *Individualisierung im Fach Mathematik: Effekte auf Leistung und Emotionen* [Dissertation]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund.
- Tulodziecki, G. (2010). Standards für die Medienbildung als eine Grundlage für die empirische Erfassung von Medienkompetenz-Niveaus. In B. Herzig, D. M. Meister, H. Moser & H. Niesyto (Hrsg.), *Jahrbuch Medienpädagogik 8* (S. 81–101). VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-531-92135-8_5
- Tunstall, P. & Gsipp, C. (1996). Teacher Feedback to Young Children in Formative Assessment: a typology. *British Educational Research Journal*, 22(4), 389–404. <https://doi.org/10.1080/0141192960220402>
- Urban, D., Mayerl, J. & Wahl, A. (2016). *Regressionsanalyse bei fehlenden Variablenwerten (missing values): Imputation oder Nicht-Imputation? Eine Anleitung für die Regressionspraxis mit SPSS*. Schriftenreihe des Instituts für Sozialwissenschaften der Universität Stuttgart (2. Korrigierte Auflage).
- Usiskin, Z. (2008). The Arithmetic Curriculum and the Real World. In D. de Bock, Søndergaard, Bettina D., B. A. Gómez & C. C. L. Cheng (Vorsitz), *Proceedings of ICME-11 – Topic Study Group 10, Research and Development of Number Systems and Arithmetic*, Monterey.
- Vamvakoussi, X., van Dooren, W. & Verschaffel, L. (2012). Naturally biased? In search for reaction time evidence for a natural number bias in adults. *The Journal of Mathematical Behavior*, 31(3), 344–355. <https://doi.org/10.1016/j.jmathb.2012.02.001>

- van der Kleij, F. M., Eggen, T. J. H. M., Timmers, C. F. & Veldkamp, B. P. (2011). Effects of feedback in a computer-based assessment for learning. *Computers & Education*, 58(1), 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.020>
- van der Kleij, F. M., Feskens, R. C. W. & Eggen, T. J. H. M. (2015). Effects of Feedback in a Computer-Based Learning Environment on Students' Learning Outcomes. *Review of Educational Research*, 85(4), 475–511. <https://doi.org/10.3102/0034654314564881>
- van der Kleij, F. M. & Lipnevich, A. A. (2020). *Student perceptions of assessment feedback: a critical scoping review and call for research*. Springer.
- van Hoof, J., Degrande, T., Ceulemans, E., Verschaffel, L. & van Dooren, W. (2018). Towards a mathematically more correct understanding of rational numbers: A longitudinal study with upper elementary school learners. *Learning and Individual Differences*, 61, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2017.11.010>
- VanLehn, K. (2011). The Relative Effectiveness of Human Tutoring, Intelligent Tutoring Systems, and Other Tutoring Systems. *Educational Psychologist*, 46(4), 197–221. <https://doi.org/10.1080/00461520.2011.611369>
- Veugen, M. J., Gulikers, J. & den Brok, P. (2021). We agree on what we see: Teacher and student perceptions of formative assessment practice. *Studies in Educational Evaluation*, 70, 101027. <https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2021.101027>
- Vieluf, S., Praetorius, A.-K., Rakoczy, K., Kleinknecht, M. & Pietsch, M. (2020). Angebots-Nutzungs-Modelle der Wirkweise des Unterrichts. Ein kritischer Vergleich verschiedener Modellvarianten. *Zeitschrift für Pädagogik*, 66, 63–80. <https://doi.org/10.25656/01:25864>
- Vodafone Stiftung Deutschland. (2020). *Schule auf Distanz: Perspektiven und Empfehlungen für den neuen Schulalltag. Eine repräsentative Befragung von Lehrkräften in Deutschland*.
- Vollrath, H.-J. (2001). *Mathematik Primarstufe und Sekundarstufe. Grundlagen des Mathematikunterrichts in der Sekundarstufe*. Spektrum, Akad. Verl.
- vom Hofe, R. (1995). *Grundvorstellungen mathematischer Inhalte*. Spektrum.
- vom Hofe, R. (1996). Grundvorstellungen – Basis für inhaltliches Denken. *Mathematik lehren*(78), 4–8.
- vom Hofe, R., Kleine, M., Blum, W. & Pekrun, R. (2005). Zur Entwicklung mathematischer Grundbildung in der Sekundarstufe I -: theoretische, empirische und diagnostische Aspekte. In M. Hasselhorn, H. Marx & W. Schneider (Hrsg.), *Tests und Trends. Neue Folge: Bd. 4. Diagnostik von Mathematikleistungen* (S. 263–292). Hogrefe.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society*. Harvard University Press.
- Wahl, A. (2020). *Multiple Imputation by Chained Equations: Eine Leistungsevaluation bei Schätzung von Strukturgleichungsmodellen mittels Monte-Carlo-Simulationen* [Dissertation]. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Walberg, H. J., Paschal, Rosanne A. & Weinstein, T. (1984). Homework's Powerful Effects on Learning. *Educational leadership: journal of the Department of Supervision and Curriculum Development*, 76-79.
- Wartha, S. & Güse, M. (2009). Zum Zusammenhang zwischen Grundvorstellungen zu Bruchzahlen und arithmetischem Grundwissen. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 30(3), 256–280. <https://doi.org/10.1007/BF03339082>
- Wartha, S. & Schulz, A. (2012). *Rechenproblemen vorbeugen: Grundvorstellungen aufbauen: Zahlen und Rechnen bis 100* (1. Auflage). Lehrerbücherei Grundschule. Cornelsen.

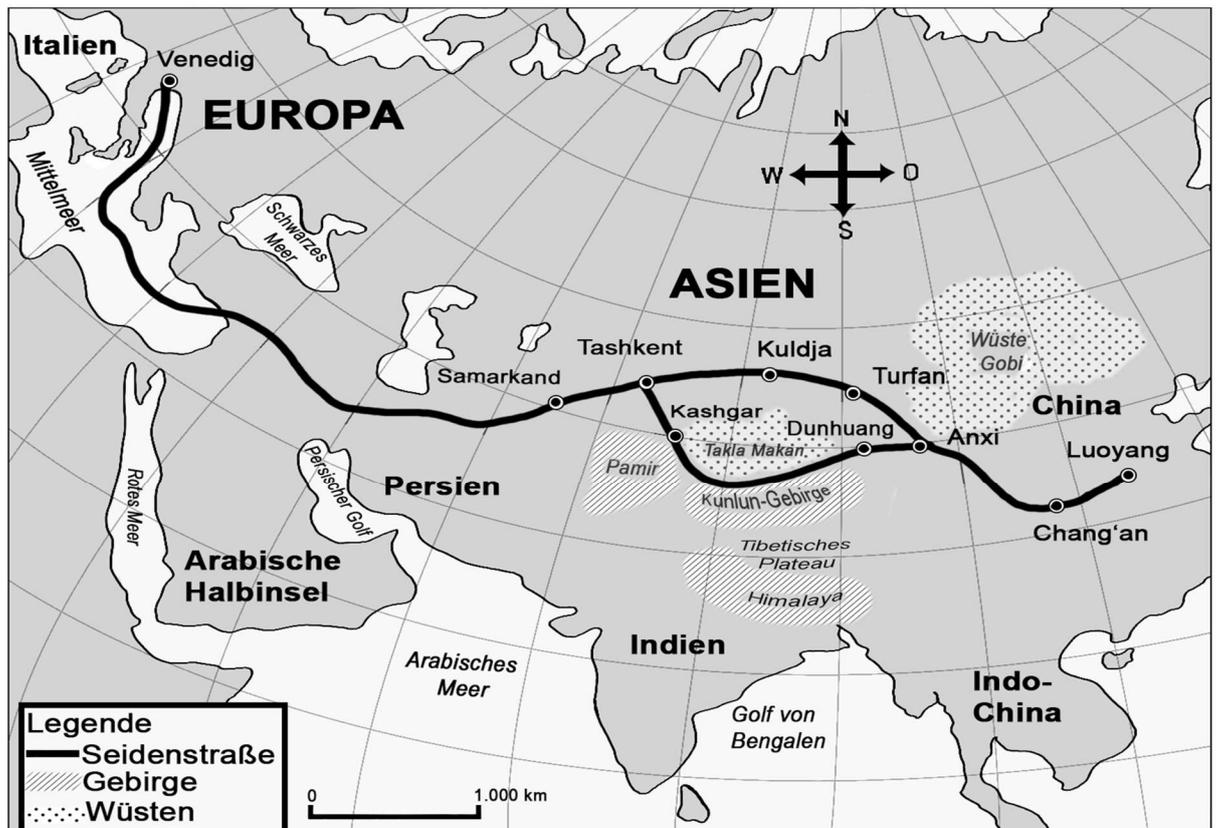
- Weddehage, K. (2011). Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Lernsoftware im Sachunterricht. *www.widerstreit-sachunterricht.de*(16).
- Weich, A., Deny, P., Priedigkeit, M. & Troeger, J. (2021). Adaptive Lernsysteme zwischen Optimierung und Kritik. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 44, 22–51. <https://doi.org/10.21240/mpaed/44/2021.10.27.X>
- Winstone, N. E., Nash, R. A., Parker, M. & Rowntree, J. (2017). Supporting Learners' Agentic Engagement With Feedback: A Systematic Review and a Taxonomy of Recipience Processes. *Educational Psychologist*, 52(1), 17–37. <https://doi.org/10.1080/00461520.2016.1207538>
- Winter, H. (1999). *Mehr Sinnstiftung, mehr Einsicht, mehr Leistungsfähigkeit im Mathematikunterricht, dargestellt am Beispiel der Bruchrechnung*. Zugriff am 25.07.2023 unter <http://www.matha.rwth-aachen.de/de/lehre/ss09/sfd/Bruchrechnen.pdf>
- Wisniewski, B., Zierer, K. & Hattie, J. (2020). The Power of Feedback Revisited: A Meta-Analysis of Educational Feedback Research. *Frontiers in psychology*, 10, 3087. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.03087>
- Wittmann, E. C. (1992). Üben im Lernprozeß. In E. C. Wittmann & G. N. Müller (Hrsg.), *Handbuch produktiver Rechenübungen* (S. 175–182). Klett-Schulbuchverlag.
- Wynands, A. (2006). Intelligentes Üben. In W. Blum, C. Drüke-Noe, R. Hartung & O. Köller (Hrsg.), *Mathematik: konkret, Sekundarstufe I: Aufgabenbeispiele, Unterrichts Anregungen, Fortbildungsideen* (S. 113–125). Cornelsen-Scriptor.
- Yap, B. W. & Sim, C. H. (2011). Comparisons of various types of normality tests. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 81(12), 2141–2155. <https://doi.org/10.1080/00949655.2010.520163>
- Yorke, M. (2003). Formative assessment in higher education: Moves towards theory and the enhancement of pedagogic practice. *Higher Education*, 45(4), 477–501. <https://doi.org/10.1023/A:1023967026413>
- Zierer, K. (2022). *Hattie für gestresste Lehrer: Kernbotschaften und Handlungsempfehlungen aus John Hatties „Visible Learning“ und „Visible Learning for Teachers“* (4. unveränderte Auflage). Schneider Verlag Hohengehren.
- Zimmermann, K. (2019). *Keine Zeit für den C-Test? Eine empirische Untersuchung zum Einfluss einer Geschwindigkeitskomponente auf das Konstrukt des C-Tests*. Universitätsverlag der TU Berlin.
- Zorn, I. (2011). Medienkompetenz und Medienbildung mit Fokus auf Digitale Medien. In H. Moser, Grell P. & H. Niesyto (Hrsg.), *Medienbildung und Medienkompetenz* (S. 175–209). kopaed.

Anhang

Anhang 1: VERA-8 Deutsch Aufgabe „Seidenstraße“

Die Seidenstraße

- 1 „Made in China“ – das gab es hier schon vor zweitausend Jahren! Die wichtigste Handelsroute zwischen Asien und Europa war bereits vor unserer heutigen Zeitrechnung bis ins 15. Jahrhundert die Seidenstraße. Tatsächlich war die kostbare Seide aus China nur eines der Handelsgüter, die mit Karawanen¹ und Schiffen
- 5 transportiert wurden. Auch Gewürze, Glas, Porzellan, Wolle, Gold, Pelze, Lacke, Eisen und vieles mehr wurde gehandelt. Die Seidenstraße war ungefähr 8.000 Kilometer lang!



- Die erste Karawane soll um das Jahr 100 vor Christus von Chinas alter Hauptstadt Chang'an gestartet sein. Ein echtes Abenteuer! Denn der Weg führte zum Beispiel
- 10 durch die Randbereiche der gefährlichen Takla-Makan-Salzwüste und er bezwang sogar die schneebedeckten Höhen des Pamir-Gebirges. Die Händler bereisten nicht die ganze beschwerliche Route über Gebirgspässe, durch Wüsten und über Meere, sondern nur einen Abschnitt, um an einem der Handelsorte ihre Ware an den nächsten Händler zu verkaufen. So wechselten die Güter oftmals ihre Besitzer, bis sie ankamen – und
- 15 waren entsprechend kostbar, selten und teuer.

Doch nicht nur Güter wurden ausgetauscht. Der Buddhismus gelangte über die Seidenstraße aus Nordindien nach China, das Christentum verbreitete sich von Vorderasien aus in beide Richtungen, wie schließlich auch der Islam. Bedeutende Erfindungen

- 20 suchten sich ihren Weg entlang der Seidenstraße: Kenntnisse über Papier- und Schwarzpulver-Herstellung oder den Steigbügel für Pferdesättel kamen z. B. aus dem asiatischen Raum in die arabischen Länder und später von dort nach Europa. Schließlich vermutet man, dass auch die Pest, die im 14. Jahrhundert in Europa wütete, über die Seidenstraße eingeschleppt wurde.
- 25 Ab dem 15. Jahrhundert hatte die Seidenstraße ihre große Bedeutung verloren. Es gab nun sicherere und weniger beschwerliche Transportwege per Schiff, außerdem machten Eroberungskriege und Kriege im Namen von Religionen die alten Wege sehr gefährlich.

Grafik und Text: IQB

¹*Karawane, die:* durch unbewohnte Gebiete [Asiens oder Afrikas] ziehende Gruppe von Reisenden, Kaufleuten, Forschern o. Ä. [mit Kamelen, Pferden oder Eseln als Lasttieren]

Teilaufgabe 1:

Was war die Seidenstraße laut Text? Sie war ...

- die sicherste Verbindung zwischen Luoyang und Venedig.
- ein Handelsweg zwischen Asien und Europa.
- die einzige Verbindung zwischen China und Europa.
- eine Handelsstraße für Seidengüter.

Teilaufgabe 2:

Die Seidenstraße wurde laut Text ...

- mehr als 2000 Jahre lang bereist.
- ungefähr 1500 Jahre lang bereist.
- ungefähr 100 Jahre lang bereist.
- ungefähr 500 Jahre lang bereist.

Teilaufgabe 3:

„*Made in China*‘ – das gab es hier schon vor zweitausend Jahren!“ (Zeile 1)

Wie ist dieser Satz zu verstehen?

Schon vor 2000 Jahren gab es ...

- die Anfertigung von Billigprodukten in China.
- chinesische Unternehmen in Europa.
- Handel mit chinesischen Produkten in Europa.
- eine Kennzeichnung von Produkten aus China.

Teilaufgabe 5:

Werden für die folgenden Bereiche Güter im Text genannt?

	ja	nein
a) Geschirr	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Metalle	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b) Stoffe	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Waffen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Teilaufgabe 11:

Treffen die folgenden Aussagen laut Text zu?

Die Seidenstraße verlor ihre Bedeutung, weil ...

	ja	nein
a) über sie die Pest nach Europa eingeschleppt wurde.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
es später weniger beschwerliche Wege gab.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
sie durch den Handel über den Seeweg abgelöst wurde.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b) die Wege aufgrund ihres Alters in gefährlichem Zustand waren.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
sie bei Eroberungskriegen beschädigt wurde.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c) sie zwischen den Religionen aufgeteilt wurde.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
sie durch gefährliche Kriegsgebiete führte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Teilaufgabe 12:

Ordne die Buchstaben den entsprechenden Textabschnitten zu.

Hinweis: Eine Überschrift bleibt übrig.

Überschriften

- A Eine Route – viele Güter
- B Neue Wege
- C Wagnisvolle Reise
- D Kultureller Austausch
- E Die Seidenstraße heute

Zeilen	Buchstabe ▽
Zeilen 1-7	
Zeilen 8-15	
Zeilen 16-23	
Zeilen 24-27	

Teilaufgabe 13:

Im Text heißt es: „*die Pest [...] wütete*“ (Zeile 22).

a) Um welches sprachliche Bild handelt es sich bei dieser Formulierung?

- Personifikation
- Vergleich
- Ironie
- Steigerung

b) Schreibe ein weiteres Beispiel für diese Art von sprachlichem Bild aus dem Text heraus.

Hinweis: Zeilenangaben sind nicht notwendig.



.....

.....

Teilaufgabe 14:

Treffen die folgenden Aussagen auf den Text zu?

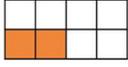
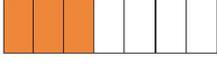
Der Text ...

ja nein

- | | | |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| a) informiert. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| problematisiert. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| übertreibt. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) veranschaulicht. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| warnt. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

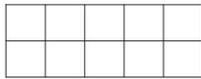
Anhang 2: Aufgaben der Intervention

Tabelle 33: Darstellung aller Aufgaben der Intervention

Aufgaben Nr.	Aufgabe	Konzeptuell vs. prozedural
1	<p><u>Erweitere</u> auf Hundertstel.</p> $\frac{4}{10} = \frac{\square}{\square}$	Probeaufgabe
2	<p>Berechne $\frac{4}{5} - \frac{3}{5}$.</p> $\frac{4}{5} - \frac{3}{5} =$	Probeaufgabe
3	<p>Färbe $\frac{5}{7}$ des Kreises.</p> 	Probeaufgabe
4	<p>Überlege, wie du die Unterteilung des Kreises vervollständigen kannst und gib an, welcher <u>Anteil</u> orange gefärbt ist.</p>  <p> des Kreises ist orange gefärbt.</p> <p> <input type="radio"/> $\frac{1}{2}$ <input type="radio"/> $\frac{1}{4}$ <input type="radio"/> $\frac{1}{6}$ <input type="radio"/> $\frac{1}{8}$ <input type="radio"/> $\frac{1}{10}$ <input type="radio"/> $\frac{1}{12}$ </p>	Konzeptuell
5	<p>Überlege, wie du die Unterteilung des Kreises vervollständigen kannst und gib an, welcher <u>Anteil</u> orange gefärbt ist.</p>  <p> des Kreises ist orange gefärbt.</p> <p> <input type="radio"/> $\frac{3}{6}$ <input type="radio"/> $\frac{2}{8}$ <input type="radio"/> $\frac{1}{8}$ <input type="radio"/> $\frac{3}{8}$ <input type="radio"/> $\frac{4}{8}$ <input type="radio"/> $\frac{3}{7}$ </p>	Konzeptuell
6	<p>Welcher <u>Anteil</u> des Rechtecks ist orange gefärbt?</p>  <p>Wähle aus:</p> <p><input type="radio"/> $\frac{6}{8}$</p>	Konzeptuell
7	<p>Welcher <u>Anteil</u> des Rechtecks ist orange gefärbt?</p>  <p><input type="checkbox"/> des Rechtecks ist orange gefärbt.</p>	Konzeptuell

8

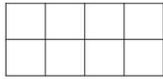
Färbe $\frac{4}{10}$ des Rechtecks.



Konzeptuell

9

Färbe $\frac{5}{8}$ des Rechtecks.



Konzeptuell

10

Bestimme die Erweiterungszahl und vervollständige den Bruch.

$$\frac{8}{12} = \frac{16}{\square}$$

Diagram showing the fraction $\frac{8}{12}$ being expanded to $\frac{16}{\square}$. Arrows indicate the multiplication of both numerator and denominator by 2. There are empty boxes for the multiplier (2) and the new denominator (24).

Prozedural

11

Bestimme die Erweiterungszahl und vervollständige den Bruch.

$$\frac{8}{17} = \frac{40}{\square}$$

Diagram showing the fraction $\frac{8}{17}$ being expanded to $\frac{40}{\square}$. Arrows indicate the multiplication of both numerator and denominator by 5. There are empty boxes for the multiplier (5) and the new denominator (85).

Prozedural

12

Kürze $\frac{78}{104}$ auf einen Bruch mit Nenner 8.
Bestimme die Kürzungszahl und vervollständige den Bruch.

$$\frac{78}{104} = \frac{\square}{8}$$

Diagram showing the fraction $\frac{78}{104}$ being simplified to $\frac{\square}{8}$. Arrows indicate the division of both numerator and denominator by 13. There are empty boxes for the multiplier (13) and the new numerator (6).

Prozedural

13

Vervollständige den Bruch.

$$\frac{72}{80} = \frac{\square}{10}$$

Prozedural

14

Kürze den Bruch zu weit wie möglich.

$$\frac{4}{14} = \frac{\square}{\square}$$

Prozedural

15

Kürze den Bruch zu weit wie möglich.

$$\frac{17}{51} = \frac{\square}{\square}$$

Prozedural

16

Wandle den unechten Bruch in eine gemischte Zahl um.

$$\frac{23}{5} = \square$$

Prozedural

17

Wandle den unechten Bruch in eine gemischte Zahl um.

$$\frac{17}{5} = \square$$

Prozedural

18

Gib die **gemischte Zahl** $2\frac{4}{7}$ als **unechten Bruch** an.

$$2\frac{4}{7} = \square$$

Prozedural

19

Wandle die **gemischte Zahl** in einen **unechten Bruch** um.

$$1\frac{1}{12} = \square$$

Prozedural

20



In welcher Darstellung ist der gleiche **Anteil** orange gefärbt?



Konzeptuell

21



In welcher Darstellung ist der gleiche **Anteil** orange gefärbt?



Konzeptuell

22

Berechne $\frac{1}{6} + \frac{3}{4}$.
Bilde zuerst den **Hauptnenner** und addiere anschließend die **Brüche**.

Prozedural

23

Berechne $4\frac{2}{3} + 1\frac{1}{4}$.

$$4\frac{2}{3} + 1\frac{1}{4} = \square$$

Prozedural

Anhang 3: C-Test

Unten siehst du zwei kurze Texte. Bei vielen Wörtern fehlt das Ende. Ergänze möglichst viele Wörter.

Beispiel:

- Es war ein _____ ein kleines Mäd _____.

Du ergänzt:

- Es war einmal ein kleines Mädchen.

REGIERUNG BESCHLIESST RAUCHVERBOT IN ZÜGEN UND ÄMTERN

Ab 1. Sept ember ist Sch luss mit Rau chen in al len Bahnhö fen, Zügen, Bus sen, Flugz eugen und Taxis. Das hat d as Bundeskabinett besch lossen. Auch in Arbeitsagen turen und ru nd 500 Minis terien, Behörden und Ger ichten gilt dann Rauchverbot. W er trotzdem z ur Zigarette gre ift, muss mit Bußgel d zwischen fü nfzig/nf/nfhundert und 1.000 Euro rec hnen. Das ursprü nglich debattierte Rauchverbot in Gaststä tten fällt nicht in die Zustän digkeit des Bun des. Die Bahn kündigte bereits a n, nur noch rauchfr eie Züge fahren zu lassen.

Hamburger Abendblatt, 1. März 2007

ANGST UM ARBEITSPLATZ: VIELE HAMBURGER GEHEN KRANK INS BÜRO

40 Grad Fie ber, Hus ten und Müdi gkeit: Eine Erkältungs- und Grippewe lle schwappt über Hamburg hinw eg. Das Robert-Koch-Institut wa rnt vor dem Influenza-Vi rus, das sich se it der verga ngenen Woche immer mehr verb reitet hat. Eigen tlich müssten die Krankenkassen überquellen vor Arbeitsunfähigkeitsbeschei den/bescheinigungen (AU). Doch die neuen Zah len der Krankenkassen bestä tigen: Immer mehr Hamburger gehen z ur Arbeit – obw ohl sie krank sind. Und auch bundeswe ite Zahlen belegen: Immer wen iger Arbeitnehmer las sen sich krankschr eiben. V on Juli b is Dezember 2006 kuri erten durchschnittlich ttlich 3,21 von hun dert Angestellten ihre Krankheiten zu Hause aus – niedrigster Stand seit 15 Jahren.

Hamburger Abendblatt, 2. März 2007

Anhang 4: Cronbachs Alpha, Trennschärfen und Schwierigkeitsindexe

Tabelle 34: Trennschärfe r_{it} und Schwierigkeitsindex P_i aller Items zur Erfassung der Bruchrechenleistung

	Mzp 1		Mzp 2	
	r_{it}	P_i	r_{it}	P_i
Item 1	.94	.76	.94	.92
Item 2	.94	.78	.94	.91
Item 3	.94	.22	.94	.44
Item 4	.94	.55	.94	.55
Item 5	.94	.26	.93	.33
Item 6	.94	.29	.93	.25
Item 7	.94	.15	.93	.19
Item 8	.94	.15	.93	.20
Item 9	.94	.09	.93	.18
Item 10	.94	.32	.93	.37
Item 11	.94	.27	.93	.38
Item 12	.94	.34	.93	.39
Item 13	.94	.20	.93	.21
Item 14	.94	.23	.93	.20
Item 15	.94	.23	.93	.27
Item 16	.94	.34	.93	.44
Item 17	.94	.14	.93	.17
Item 18	.94	.05	.93	.04
Item 19	.94	.14	.94	.25
Item 20	.94	.23	.94	.35
Item 21	.94	.16	.93	.24
Item 22	.94	.35	.94	.41
Item 23	.94	.39	.93	.46
Item 24	.94	.42	.93	.52
Item 25	.94	.43	.93	.49
Item 26	.94	.18	.94	.26
Item 27	.94	.34	.94	.48
Item 28	.94	.36	.94	.49
Item 29	.94	.23	.94	.26
Item 30	.94	.53	.93	.57
Item 31	.94	.28	.94	.34
Item 32	.94	.56	.94	.64
Item 33	.94	.36	.93	.47
Item 34	.94	.28	.94	.28
Item 35	.94	.13	.93	.13
Item 36	.94	.15	.93	.13
Item 37	.94	.15	.93	.14

Tabelle 35: Trennschärfe r_{it} und Schwierigkeitsindex P_i Items des konzeptuellen Wissens zur Bruchrechnung

	Mzp 1		Mzp 2	
	r_{it}	P_i	r_{it}	P_i
Item 1	.86	.76	.85	.92
Item 2	.86	.78	.85	.91
Item 3	.86	.22	.84	.44
Item 4	.86	.55	.84	.55
Item 5	.86	.26	.84	.33
Item 6	.87	.29	.85	.25
Item 7	.86	.15	.83	.19
Item 8	.86	.15	.84	.20
Item 9	.86	.09	.84	.18
Item 10	.85	.32	.83	.37
Item 11	.85	.27	.83	.38
Item 12	.85	.34	.84	.39
Item 13	.85	.20	.83	.21
Item 14	.85	.23	.84	.20
Item 15	.86	.23	.83	.27
Item 16	.86	.34	.84	.44
Item 17	.86	.14	.83	.17
Item 18	.86	.05	.84	.04
Item 19	.86	.14	.84	.25

Tabelle 36: Trennschärfe r_{it} und Schwierigkeitsindex P_i des prozeduralen Wissens zur Bruchrechnung

	Mzp 1		Mzp 2	
	r_{it}	P_i	r_{it}	P_i
Item 20	.92	.23	.91	.35
Item 21	.93	.16	.91	.24
Item 22	.93	.35	.91	.41
Item 23	.93	.39	.91	.46
Item 24	.93	.42	.91	.52
Item 25	.93	.43	.91	.49
Item 26	.92	.18	.91	.26
Item 27	.92	.34	.91	.48
Item 28	.92	.36	.91	.49
Item 29	.92	.23	.91	.26
Item 30	.93	.53	.91	.57
Item 31	.93	.28	.91	.34
Item 32	.92	.56	.91	.64
Item 33	.93	.36	.91	.47
Item 34	.92	.28	.91	.28
Item 35	.92	.13	.91	.13
Item 36	.92	.15	.91	.13
Item 37	.93	.15	.91	.14

Tabelle 37: Trennschärfe r_{it} und Schwierigkeitindex P_i der Skala „allgemeinen kognitiven Fähigkeiten“ (Mzp 1)

	r_{it}	P_i
Item 1	.91	.74
Item 2	.91	.45
Item 3	.91	.61
Item 4	.91	.45
Item 5	.91	.52
Item 6	.91	.40
Item 7	.91	.42
Item 8	.91	.51
Item 9	.91	.47
Item 10	.91	.38
Item 11	.91	.41
Item 12	.91	.47
Item 13	.91	.36
Item 14	.91	.52
Item 15	.91	.40
Item 16	.91	.46
Item 17	.91	.37
Item 18	.91	.30
Item 19	.91	.56
Item 20	.91	.45
Item 21	.91	.39
Item 22	.91	.42
Item 23	.91	.26
Item 24	.91	.36
Item 25	.91	.38

Tabelle 38: Trennschärfe r_{it} und Schwierigkeitindex P_i für die Skala „Lesefähigkeiten“

	r_{it}	P_i
Item 1	.95	.97
Item 2	.95	.50
Item 3	.95	.82
Item 4	.95	.89
Item 5	.95	.94
Item 6	.95	.88
Item 7	.95	.98
Item 8	.95	.94
Item 9	.95	.76
Item 10	.95	.29
Item 11	.95	.59
Item 12	.95	.10
Item 13	.95	.13
Item 14	.95	.39
Item 15	.95	.47
Item 16	.95	.34
Item 17	.95	.81
Item 18	.95	.63
Item 19	.95	.50
Item 20	.95	.72
Item 21	.95	.73
Item 22	.95	.20
Item 23	.95	.73

Item 24	.95	.50
Item 25	.95	.75
Item 26	.95	.80
Item 27	.95	.86
Item 28	.95	.85
Item 29	.95	.61
Item 30	.95	.72
Item 31	.95	.44
Item 32	.95	.57
Item 33	.95	.25
Item 34	.95	.47
Item 35	.95	.53
Item 36	.95	.54
Item 37	.95	.47
Item 38	.95	.80
Item 39	.95	.69
Item 40	.95	.77
Item 41	.95	.82
Item 42	.95	.35
Item 43	.95	.35
Item 44	.95	.79
Item 45	.95	.79
Item 46	.95	.48
Item 47	.95	.58
Item 48	.95	.16
Item 49	.95	.75
Item 50	.95	.70

Tabelle 39: Trennschärfe r_{it} der Subskala „intrinsic Motivation“

	r_{it}
Item 1	.64
Item 2	.73
Item 3	.82

Tabelle 40: Trennschärfe r_{it} der Subskala „situatives Interesse“

	r_{it}
Item 4	.67
Item 5	.58
Item 6	.81

Tabelle 41: Trennschärfe r_{it} der Subskala „Belastung“

	r_{it}
Item 7	.76
Item 8	.46
Item 9	.69

Tabelle 42: Trennschärfe r_{it} der Subskala „Kompetenzunterstützung“

	r_{it}
Item 1	.73
Item 2	.77
Item 3	.77
Item 4	.75
Item 5	.72

Tabelle 43: Trennschärfe r_{it} der Subskala „Kompetenzerleben“

	r_{it}
Item 6	.55
Item 7	.53
Item 8	.71

Tabelle 44: Trennschärfe r_{it} der Subskala „Nützlichkeit“

	r_{it}
Item 9	.58
Item 10	.58
Item 11	.64

Tabelle 45: Trennschärfe r_{it} der Subskala „Verstehensunterstützung“

	r_{it}
Item 12	.65
Item 13	.69
Item 14	.65
Item 15	.75

Tabelle 46: Trennschärfe r_{it} der Subskala „konstruktive Unterstützung“

	r_{it}
Item 16	.73
Item 17	.78
Item 18	.73
Item 19	.75

Anhang 5: Missing Data

Tabelle 47: Darstellung der fehlenden Werte pro Schüler*innen

Anzahl fehlender Werte	Absoluter Anteil an SuS	Relativer Anteil an SuS (in %)
0	80	58.4
1	25	18.2
2	9	6.6
3	5	3.6
4	3	2.2
5	1	0.7
6	3	2.2
7	2	1.5
8	2	1.5
9	2	1.5
10	1	0.7
11	1	0.7
14	2	1.5
16	1	0.7

Tabelle 48: Darstellung der fehlenden Werte pro Item

Item	Absoluter Anteil fehlender Werte	Relativer Anteil fehlender Werte (in %)
MathSwe 1	1	0.7
MathSwe 2	4	2.9
MathSwe 3	5	3.6
MathSwe 4	7	5.1
MathMot 1	4	2.9
MathMot 2	7	5.1
MathMot 3	2	1.5
MathMot 4	3	2.2
MathInt 1	3	2.2
MathInt 2	5	3.6
MathInt 3	3	2.2
MathInt 4	4	2.9
MathSk 1	1	0.7
MathSk 2	0	0
MathSk 3	4	2.9
MathSk 4	5	3.6
MathSk 5	4	2.9
MathAng 1	1	0.7
MathAng 2	2	1.5
MathAng 3	0	0
MathAng 4	5	3.6
MathAng 5	2	1.5
DigMedEinst 1	1	0.7
DigMedEinst 2	1	0.7
DigMedEinst 3	1	0.7
DigMedInt 1	1	0.7
DigMedInt 2	2	1.5
DigMedInt 3	0	0
DigMedInt 4	2	1.5
DigMedInt 5	6	4.4
DigMedInt 6	1	0.7

DigMedKomp 1	0	0
DigMedKomp 2	2	1.5
DigMedKomp 3	3	2.2
DigMedKomp 4	2	1.5
DigMedKomp 5	2	1.5
IntrMot 1	3	2.2
IntrMot 2	3	2.2
IntrMot 3	3	2.2
SitInt 1	2	1.5
SitInt 2	2	1.5
SitInt 3	7	5.1
Bel 1	3	2.2
Bel 2	4	2.9
Bel 3	3	2.2
WNützlich 1	3	2.2
WNützlich 2	3	2.2
WNützlich 3	2	1.5
WKompUnt 1	2	1.5
WKompUnt 2	1	0.7
WKompUnt 3	2	1.5
WKompUnt 4	1	0.7
WKompErl 5	3	2.2
WKompErl 1	2	1.5
WKompErl 2	2	1.5
WKompErl 3	8	5.8
WKompErl 4	3	2.2
WKonstUnt 1	1	0.7
WKonstUnt 2	2	1.5
WKonstUnt 3	3	2.2
WKonstUnt 4	0	0
WVerstUnt 1	6	4.4
WVerstUnt 2	3	2.2
WVerstUnt 3	3	2.2
WVerstUnt 4	4	2.9

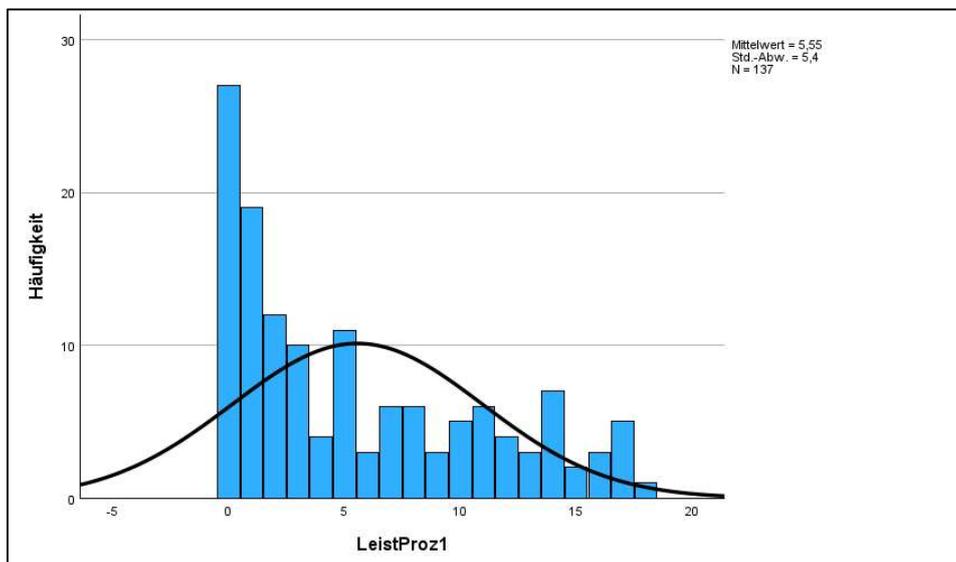
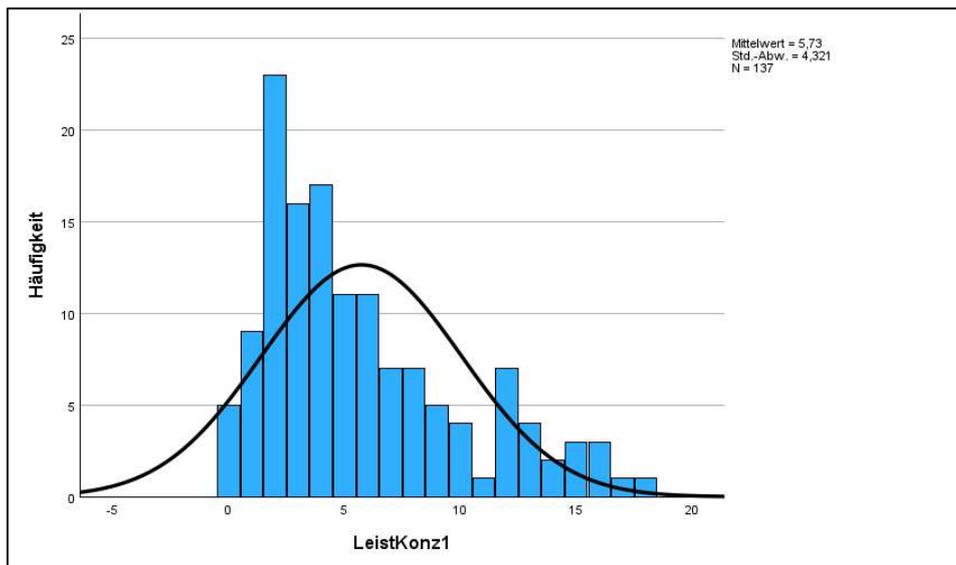
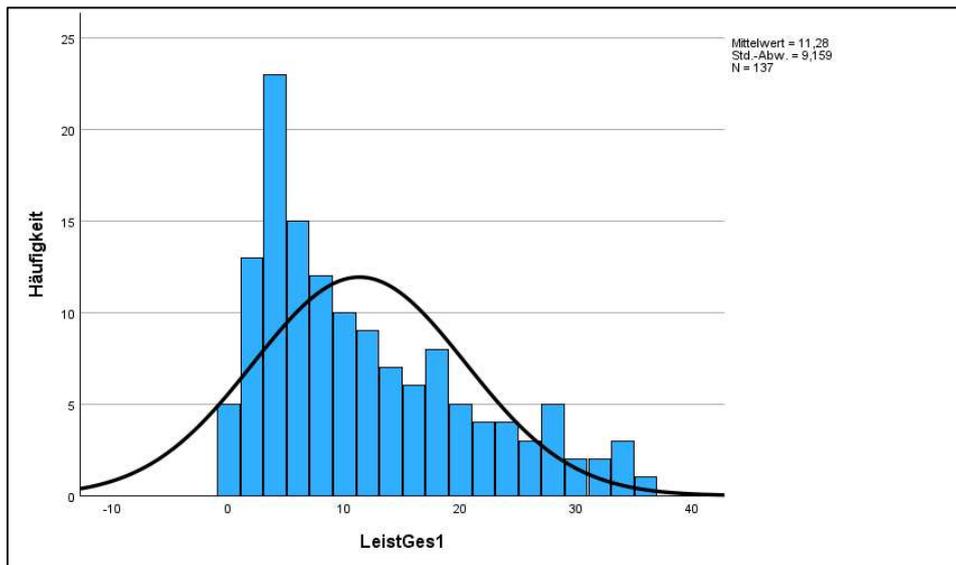
Anhang 6: Test auf Normalverteilung der zu imputierenden Items

Tabelle 49: Test auf Normalverteilung zur Prüfung der Voraussetzung der Multiplen Imputation, nv = normalverteilt

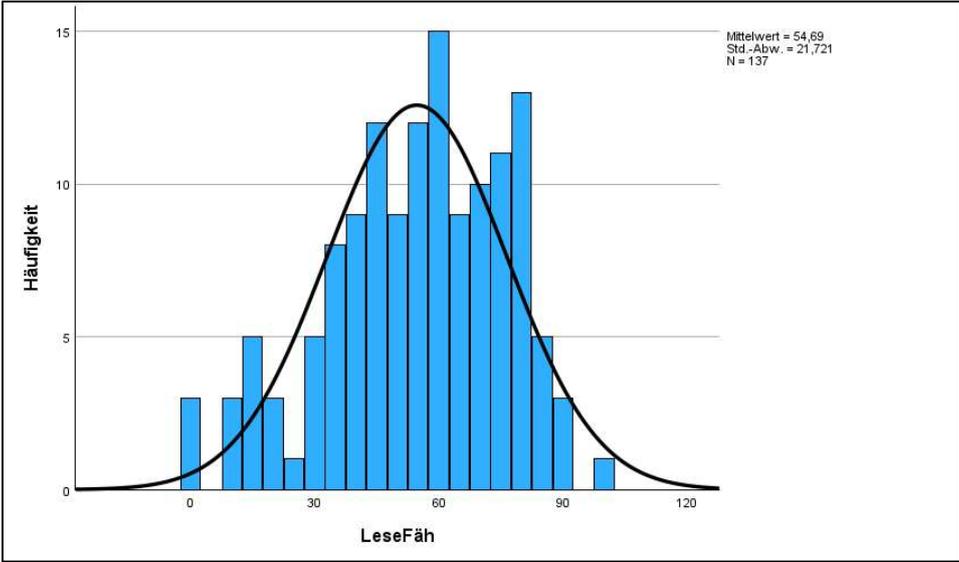
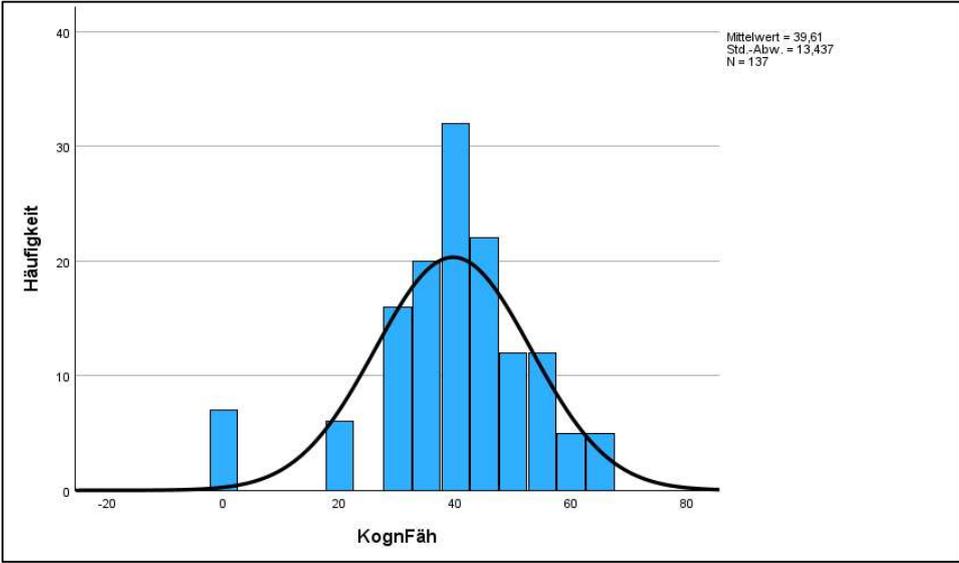
Variable/Item	Schiefe/Kurtosis	Kolmogoroff-Smirnov-Test	Diagramme	
MathMot 1	0.58/-1.66 nv	Nicht nv	nv	
MathMot 2	0.94/-1.09 nv	Nicht nv	nv	
MathMot 3	1.07/-0.95 nv	Nicht nv	nv	
MathMot 4	1.18/-1.26 nv	Nicht nv	nv	
MathSk 1	0.99/-1.26	Nicht nv	nv	
MathSk 2	-3.31/-0.55	Nicht nv	Nicht nv	Rechtssteil
MathSk 3	2.8/0.82	Nicht nv	Nicht nv	Rechtssteil
MathSk 4	0.45/1.66 nv	Nicht nv	nv	
MathSk 5	1.31/-2.47 nicht nv	Nicht nv	nv	
MathAng 1	0.79/-2.04 nicht nv	Nicht nv	nv	
MathAng 2	2.57/-1.03 nicht nv	Nicht nv	Nicht nv	Linkssteil
MathAng 3	4.04/-0.33 nicht nv	Nicht nv	Nicht nv	Linkssteil
MathAng 4	4.59/1.52 nicht nv	Nicht nv	Nicht nv	Linkssteil
MathAng 5	1.02/-2.29 nicht nv	Nicht nv	nv	
MathSwe 1	0.28/-1.58 nv	Nicht nv	Nv	
MathSwe 2	-1.85/-0.44 nv	Nicht nv	Nv	
MathSwe 3	0.11/-1.72 nv	Nicht nv	Nv	
MathSwe 4	-1.27/0.54 nv	Nicht nv	Nv	
MathInt 1	2.56/-0.44 nicht nv	Nicht nv	Nicht nv	Linkssteil
MathInt 2	0.40/-2.12 nicht nv	Nicht nv	Nv	
MathInt 3	0.57/-2.67 nicht nv	Nicht nv	Nicht nv	Linkssteil
MathInt 4	-1.46/-1.72 nv	Nicht nv	Nv	
IntrMot 1	-2.1/-1.7 nicht nv	Nicht nv	Nv	
IntrMot 2	-0.65/-1.35 nv	Nicht nv	Nv	
IntrMot 3	-1.06/-2.10 nicht nv	Nicht nv	Nv	
SitInt 1	-0.72/-2.14 nicht nv	Nicht nv	Nv	
SitInt 2	-1.79/-1.73 nv	Nicht nv	Nv	
SitInt 3	-0.90/2.41 nicht nv	Nicht nv	Nv	
Bel 1	2.96/0.38 nicht nv		Nicht nv	Linkssteil
Bel 2	4.08/1.87 nicht nv		Nicht nv	Linkssteil
Bel 3	2.63/0.20 nicht nv		Nicht nv	Linkssteil
WKompUnt 1	-1.49/1.14 nv		Nv	
WKompUnt 2	0.56/-1.76 nv		Nv	
WKompUnt 3	-3.60/0.21 nicht nv		Nicht nv	Rechtssteil
WKompUnt 4	-1.43/-1.37 nv		Nv	
WKompErl 5	-1.52/-0.8 nv		Nv	
WKompErl 1	0.76/-1.11 nv		Nv	
WKompErl 2	-0.78/-1.16 nv		Nv	
WKompErl 3	-0.04/-0.99 nv		Nv	
WKompErl 4	0.70/-0.98 nv		Nv	
WNützlich 1	-3.38/0.63 nicht nv		Nicht nv	Rechtssteil
WNützlich 2	-1.76/-1.79 nv		Nv	
WNützlich 3	-0.67/-1.86 nv		Nv	
WVerstUnt 1	-1.20/-0.88 nv		Nv	
WVerstUnt 2	-1.44/-0.90 nv		Nv	
WVerstUnt 3	0.28/-1.38 nv		Nv	
WVerstUnt 4	-0.91/-1.66 nv		Nv	
WKonstUnt 1	-1/-1.21 nv		Nv	
WKonstUnt 2	-1.49/-0.40 nv		Nv	
WKonstUnt 3	0.35/-1.57 nv		Nv	

WKonstUnt 4	-0.65/-1.35 nv	Nv	
DigMedEinst 1	-4.55/1.41 nicht nv	Nicht nv	Rechtssteil
DigMedEinst 2	-5.16/0.75 nicht nv	Nicht nv	Rechtssteil
DigMedEinst 3	-3.69/0.06 nicht nv	Nicht nv	Rechtssteil
DigMedKomp 1	-3.86/0.33 nicht nv	Nicht nv	Rechtssteil
DigMedKomp 2	-4.07/0.11 nicht nv	Nicht nv	Rechtssteil
DigMedKomp 3	-0.88/-1.76 nv	Nv	
DigMedKomp 4	-1.43/-0.67 nv	Nv	
DigMedKomp 5	-1.88/-0.24 nv	Nv	
DigMedInt 1	2.09/-1.49 nicht nv	Nv	
DigMedInt 2	-2.45/-1.48 nicht nv	Nicht nv	Rechtssteil
DigMedInt 3	-2.87/-1.38 nicht nv	Nicht nv	Rechtssteil
DigMedInt 4	-6.85/2.71 nicht nv	Nicht nv	Rechtssteil
DigMedInt 5	-3.45/-0.21 nicht nv	Nicht nv	Rechtssteil
DigMedInt 6	-6.01/4.63 nicht nv	Nicht nv	Rechtssteil

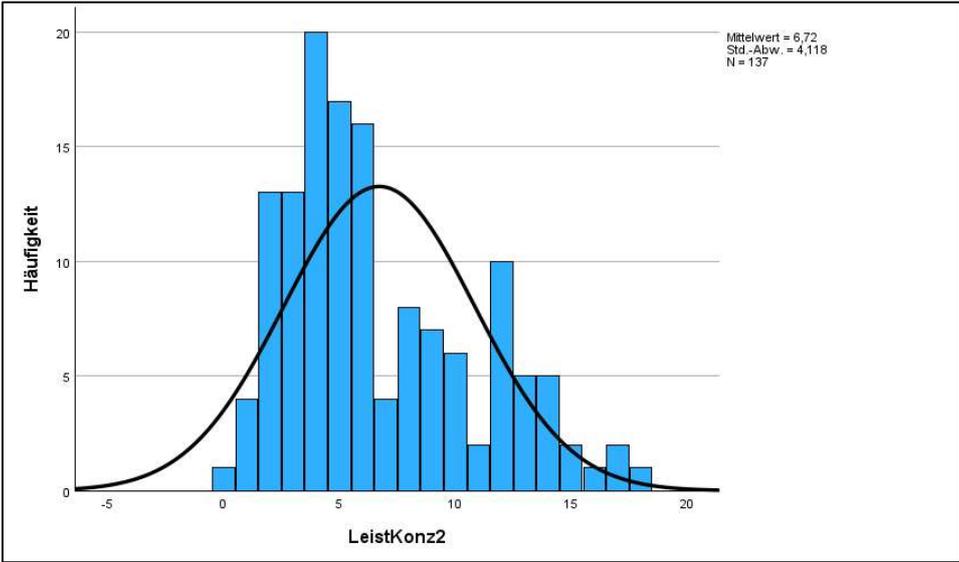
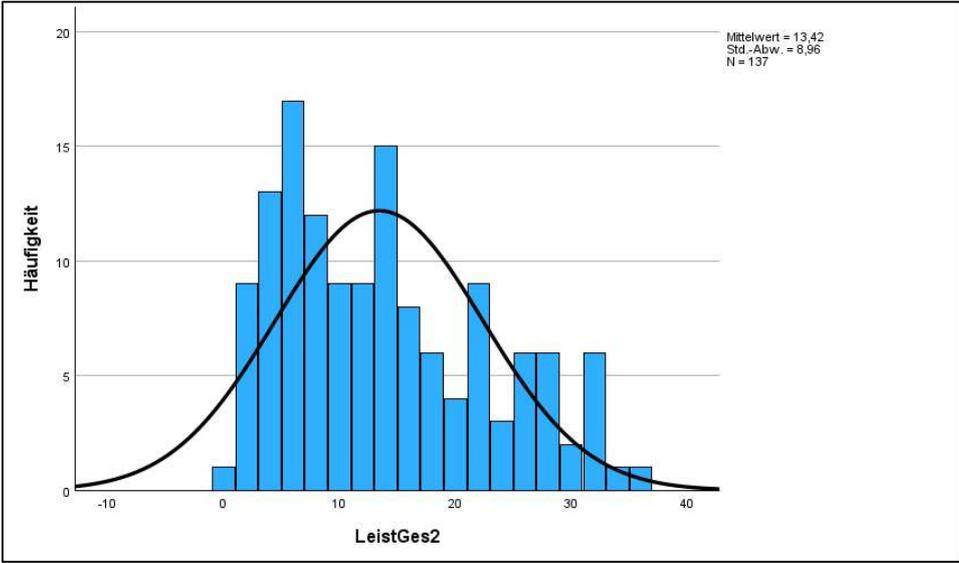
Anhang 7: Test auf Normalverteilung der Bruchrechenleistung (Mzp 1)

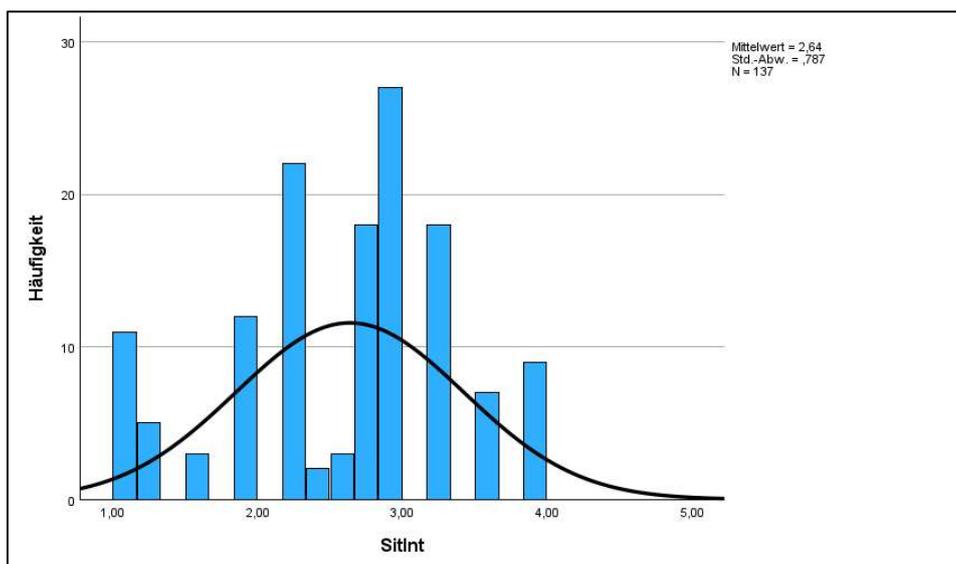
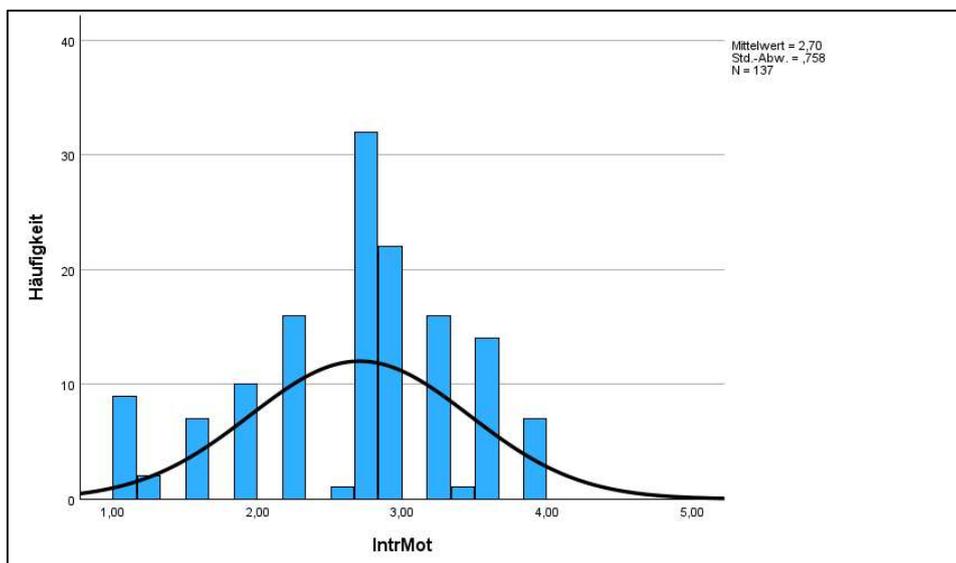
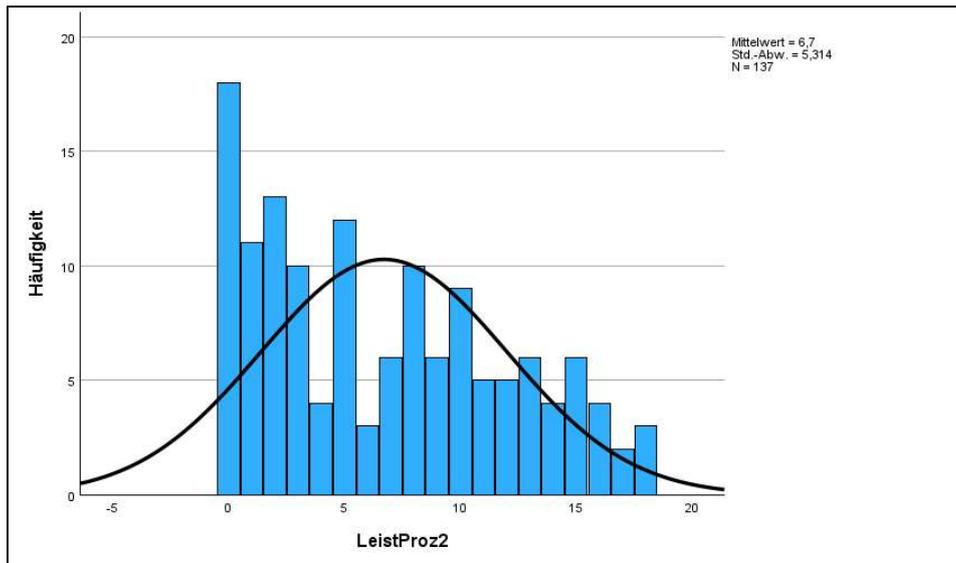


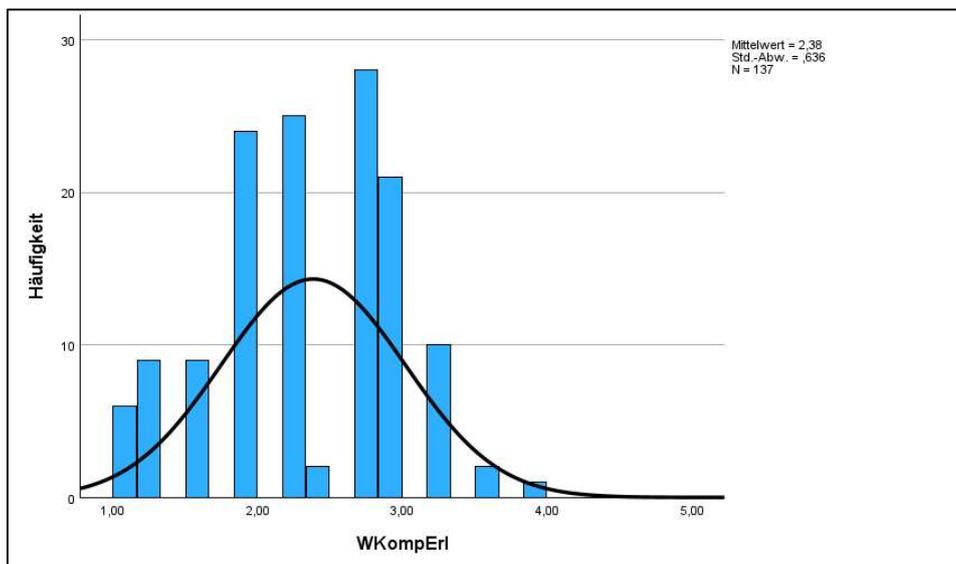
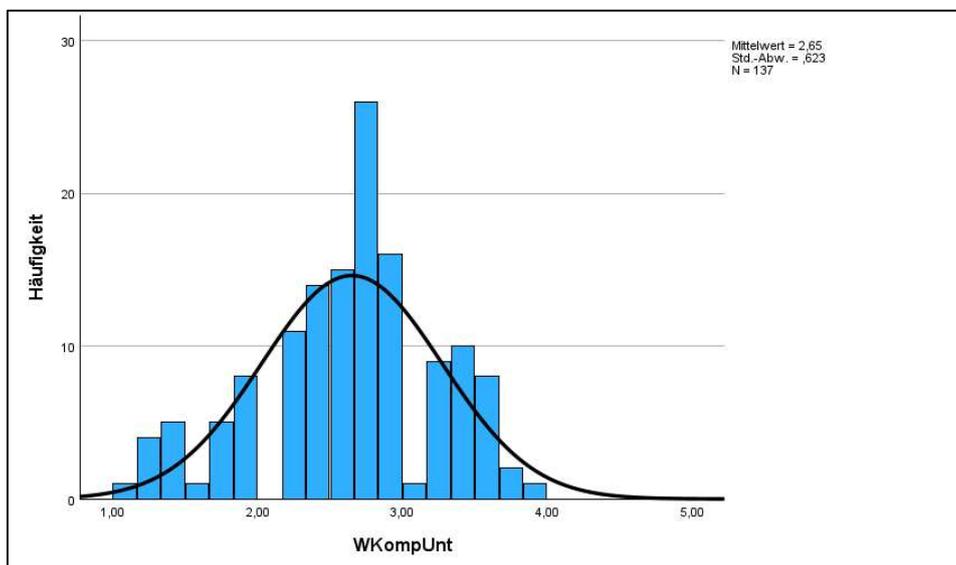
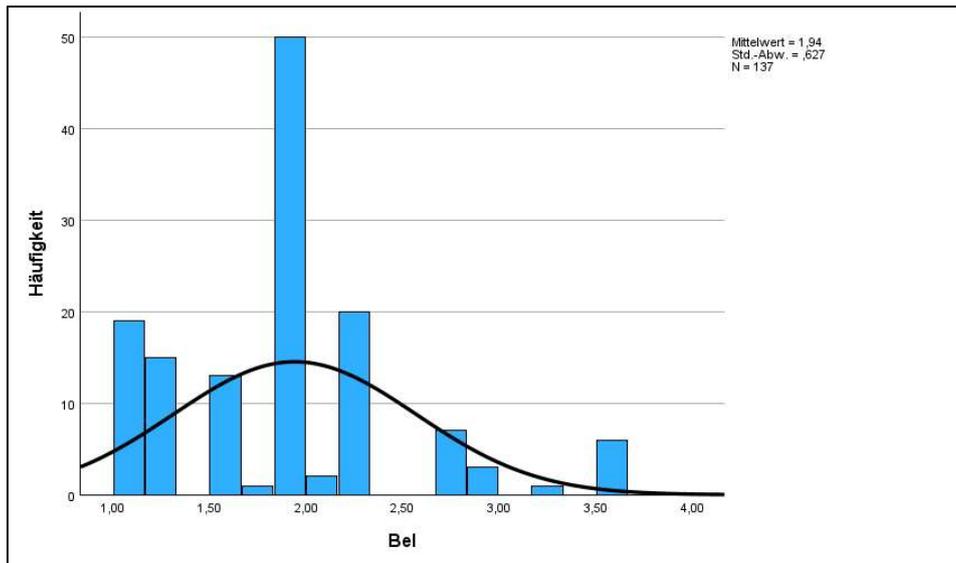
Anhang 8: Test auf Normalverteilung der kognitive Fähigkeiten und Lesefähigkeiten

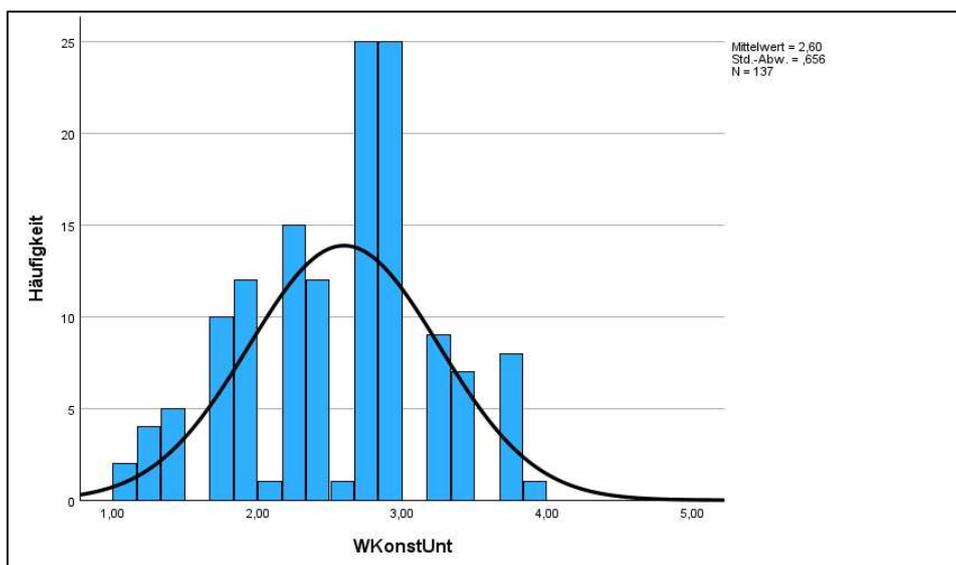
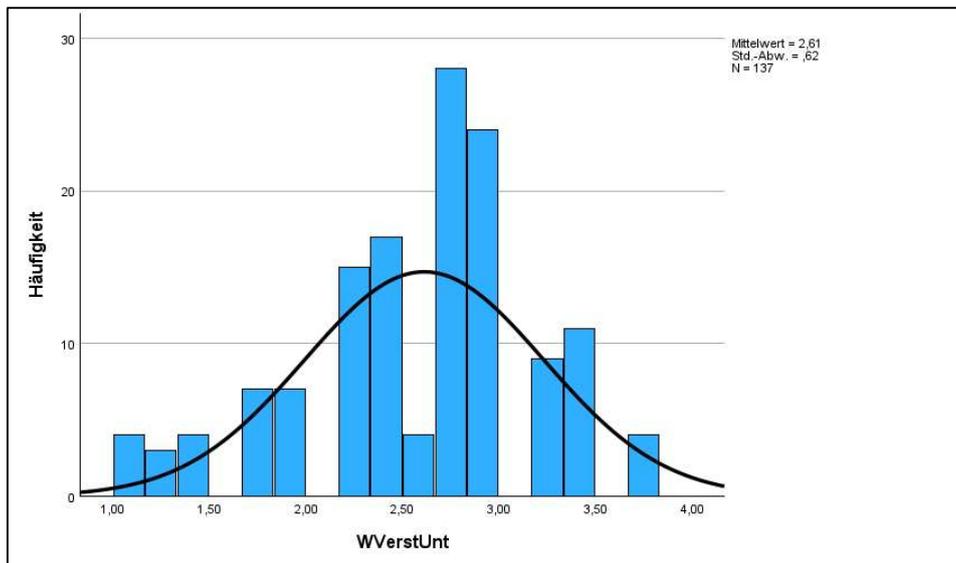
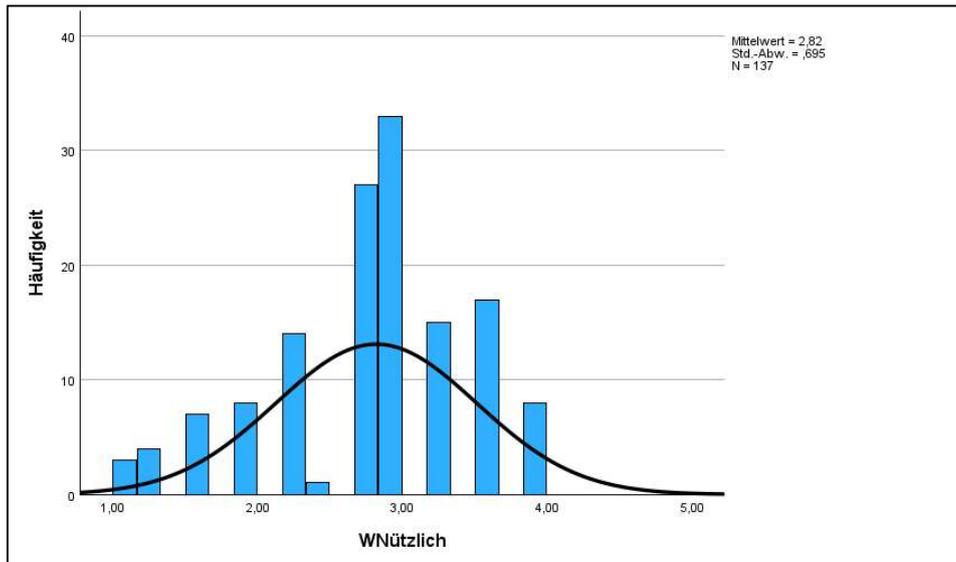


Anhang 10: Test auf Normalverteilung der Bruchrechenleistung (Mzp 2), Motivation und Emotion und Feedbackwahrnehmung









Anhang 10: Vergleich der Bruchrechenleistung unter Ausschluss von elf Proband*innen

Tabelle 50: Mittelwertsunterschiede der Bruchrechenleistung nach Mzp unter Ausschluss von elf Proband*innen

	MW Mzp 1	MW Mzp 2	MW _{Diff} (Mzp 2 – Mzp 1)	SD _{Diff}	
LeistGes	-1.14	-0.61	0.53	1.18	$t(125) = -5.60, p < .001; d_z = 0.45$
LeistKonz	-0.77	-0.26	0.51	1.20	$t(125) = -5.11, p < .001; d_z = 0.43$
LeistProz	0.01	0.49	0.48	1.08	$t(125) = -4.75, p < .001; d_z = 0.44$

d_z wurde berechnet mit: Hemmerich (2020a) (zweiseitiger Test)

Tabelle 51: Mittelwertsunterschiede nach Mzp und EG unter Ausschluss von elf Proband*innen

	MW _{Diff} EG 1	SD _{Diff} EG 1	MW _{Diff} EG 2	SD _{Diff} EG 2	
	$N = 62$		$N = 64$		
LeistGes	0.39	0.23	0.66	1.20	$t(125) = -1.36, p = .36, d = -0.23$
LeistKonz	0.31	0.19	0.70	1.19	$t(125) = -1.68, p = .20, d = -0.27$
LeistProz	0.16	0.54	0.55	1.34	$t(125) = -0.73, p = .60, d = -0.13$

d wurde berechnet mit: Hemmerich (2015) (zweiseitiger Test)

Anhang 11: Deskriptive Ergebnisse der Skalen bezogen auf digitale Medien sowie der Skalen bezogen auf motivational-emotionale Variablen

Tabelle 52: Deskriptive Ergebnisse für die Subskalen der Variablen bezogen auf digitale Medien, der motivational-emotionalen Variablen sowie der Variable „Polung des Feedbacks“

	n	Min	Max	MW	SD
Variablen bezogen auf digitale Medien					
DigMedEinst	137	1.67	4.00	3.27	.62
EG 1	70	1.67	4.00	3.34	.59
EG 2	67	1.67	4.00	3.20	.63
DigMedKomp	137	1.60	4.00	3.03	.50
EG 1	70	2.00	4.00	3.06	.49
EG 2	67	1.60	4.00	3.00	.51
DigMedInt	137	2.00	4.00	3.14	.45
EG 1	70	2.17	4.00	3.16	.45
EG 2	67	2.00	4.00	3.13	.45
Motivational-emotionale Variablen					
MathMot	137	1.00	4.00	2.49	.67
EG 1	70	1.25	4.00	2.49	.59
EG 2	67	1.00	4.00	2.50	.75
MathSk	137	1.00	4.00	5.53	3.99
EG 1	70	1.00	4.00	2.78	.69
EG 2	67	1.00	4.00	2.77	.66
MathAng	137	1.00	3.60	2.05	.62
EG 1	70	1.00	3.40	2.01	.64
EG 2	67	1.20	3.60	2.09	.61
MathSwe	137	1.00	4.00	2.78	.64
EG 1	70	1.00	4.00	2.81	.65
EG 2	67	1.48	4.00	2.74	.63
MathInt	137	1.00	4.00	2.46	.75
EG 1	70	1.00	4.00	2.48	.67
EG 2	67	1.00	4.00	2.44	.84
Feedbackpolung					
HäufFbPos	55	6	19	13.85	3.69
HäufFbNeg	55	0	18	6.65	4.45

Anhang 12: Korrelationen

Tabelle 53: Rangkorrelationen nach Spearman zwischen der Bruchrechenleistung, den allgemeinen kognitiven Fähigkeiten, der Lesefähigkeit, den motivational-emotionalen Variablen, den Variablen bezogen auf digitale Medien, den Subskalen zur Feedbackwahrnehmung sowie der Polung des Feedbacks

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1 LeistGesl	1																			
2 Leist-Konzl	.93**	1																		
3 LeistProz1	.95**	.77**	1																	
4 KognFäh	.03 (.69)	.02 (.79)	.04	1																
5 LeseFäh	.26**	.24**	.24**	.17 (.05)	1															
6 MathMot	.05 (.54)	.06 (.51)	.04 (.62)	.02 (.79)	-.06 (.95)	1														
7 MathSk	.06 (.51)	.07 (.42)	.04 (.63)	-.07 (.40)	-.07 (.40)	.37**	1													
8 MathAng	.00 (.96)	-.01 (.93)	.01 (.88)	-.08 (.35)	-.15 (.08)	.50**	.55**	1												
9 MathSwe	.15 (.09)	.07 (.40)	.19*	-.05 (.58)	.14 (.10)	-.05 (.57)	.08 (.39)	-.21*	1											
10 MathInt	.24**	.22**	.22**	-.01	.22*	-.08 (.38)	.08 (.38)	-.17 (.05)	.65**	1										
11 DigMedEinst	-.23**	-.22*	-.23**	-.08	-.18*	.09 (.29)	-.14 (.10)	.06 (.46)	-.29**	-.63**	1									
12 DigMedKomp	.18*	.18*	.16 (.06)	-.01 (.92)	.16 (.07)	-.02 (.79)	.15 (.07)	-.07 (.41)	.57**	.79**	-.62**	1								
13 DigMedInt	.15 (.09)	.09 (.29)	.17*	-.06 (.49)	.12 (.17)	.02 (.80)	.13 (.12)	-.17 (.05)	.85**	.65**	-.25**	.56**	1							
14 WKompUnt	.14 (.10)	.12 (.16)	.18*	-.08 (.38)	.17*	.25**	.03 (.70)	.08 (.33)	.11 (.21)	.21*	.12 (.17)	.15 (.07)	.16 (.07)	1						
15 WKompErl	.01 (.94)	.03 (.77)	.11 (.18)	-.03 (.69)	.13 (.14)	.33**	.02 (.84)	.16 (.06)	.07 (.42)	.32**	.06 (.48)	.11 (.22)	-.00	.73**	1					
16 WNützlich	.04 (.67)	-.03 (.72)	.06 (.52)	-.08 (.39)	.08 (.35)	.26**	.11 (.22)	.02 (.78)	.18*	.24**	.15 (.07)	.23**	.15 (.08)	.60**	.41**	1				
17 WVerstUnt	-.10 (.23)	.09 (.29)	.18*	-.04 (.67)	.01 (.94)	.18*	-.00 (.96)	.12 (.15)	.06 (.53)	.21*	.17*	.19*	.20*	.61**	.48**	.54**	1			
18 WKonstUnt	.06 (.49)	.01 (.89)	.13 (.12)	-.01 (.87)	.15 (.09)	.22**	.04 (.26)	.10 (.26)	.09 (.30)	.25**	.12 (.17)	.12 (.15)	.03 (.70)	.66**	.58**	.51**	.72**	1		
19 HäufFb-Pos	.67**	.70**	.58**	.13 (.33)	.37**	.12 (.40)	.40**	-.33*	.38**	.05 (.71)	-.10 (.48)	-.01 (.95)	-.02 (.89)	.37**	.22 (.11)	-.13 (.35)	-.16 (.26)	-.01 (.97)	1	
20 HäufFb-Neg	-.46**	-.49**	-.42**	-.17 (.21)	-.21 (.13)	.13 (.36)	-.06 (.66)	.13 (.35)	.02 (.86)	.12 (.39)	-.02 (.91)	-.10 (.47)	-.07 (.59)	-.02 (.90)	.29*	.17 (.22)	.06 (.65)	-.04 (.77)	-.39**	1

*. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.05 (2-seitig) signifikant.

** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.01 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 54: Punktbiseriale Korrelationen zwischen der Feedbacknutzung der EG 1 und den Variablen zur Feedbackwahrnehmung, den Leistungsvariablen zu Mzp 1, den motivational-emotionalen Variablen und den Variablen bezogen auf digitale Medien

	Nutzung EG 1
WKompUnt	.02
WKompErl	.02
WNützlich	.15
WVerstUnt	.13
WKonstUnt	.02
LeistGes 1	.03
LeistKonz 1	.06
LeistProz 1	.01
LeseFäh	.08
KognFäh	.09
MathMot	.12
MathSk	.03
MathAng	.05
MathSwe	.04
MathInt	.04
DigMedEinst	.10
DigMedKomp	.01
DigMedInt	.01

Tabelle 55: Rangkorrelationen nach Spearman zwischen den Feedbacknutzungsindikatoren, EG 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 NutzDauGes	1									
2 NutzDauDef	.63**	1								
3 NutzDauTip	.51**	.14	1							
		(.27)								
4 NutzDauNsc	.75**	.12	.49**	1						
		(.34)								
5 NutzDauLös	.55**	.34**	.11	.19	1					
			(.40)	(.13)						
6 NutzHäufGes	.84**	.61**	.36**	.53**	.55**	1				
7 NutzHäufDef	.57**	.82**	.17	.20	.27*	.66**	1			
			(.17)	(.11)						
8 NutzHäufTip	.65**	.31*	.85**	.50**	.36**	.59**	.40**	1		
9 NutzHäufNsc	.61**	.11	.34**	.76**	.35**	.53**	.14	.44**	1	
		(.38)								
10 NutzHäufLös	.29*	.14	-.01	.20	.63**	.36**	.07	.18	.43**	1
		(.26)	(.92)	(.10)			(.58)	(.15)		

*. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.05 (2-seitig) signifikant.

** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.01 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 56: Rangkorrelationen nach Spearman zwischen der Feedbacknutzungsdauer und den Variablen zur Feedbackwahrnehmung, den Leistungsvariablen zu Mzp 1, Variablen bezogen auf digitale Medien und motivational-emotionale Variablen, EG 2

	1	2	3	4	5
1 NutzDauGes	1				
2 NutzDauDef	.63**	1			
3 NutzDauTip	.51**	.14	1		
		(.27)			
4 NutzDauNsc	.75**	.12	.49**	1	
		(.34)			
5 NutzDauLös	.55**	.34**	.11	.19	1
			(.40)	(.13)	
Feedbackwahrnehmung					
WKompUnt	.20	.14	.08	.15	-.03
	(.13)	(.27)	(.53)	(.22)	(.82)
WKompErl	.31*	.23	.09	.20	-.01
		(.06)	(.50)	(.11)	(.94)
WNützlich	.35**	.21	.07	.28*	.18
		(.09)	(.57)		(.15)
WVerstUnt	.34**	.15	.08	.29*	.21
		(.23)	(.50)		(.08)
WKonstUnt	.25	.14	.17	.24*	.02
	(.05)	(.26)	(.18)		(.89)
Bruchrechenleistung (Mzp 1)					
LeistGes1	-.26*	-.11	-.18	-.11	-.33**
		(.37)	(.14)	(.40)	
LeistKonz1	-.35**	-.15	-.17	-.17	-.35**
		(.23)	(.18)	(.16)	
LeistProz1	-.17	-.08	-.09	-.03	-.31*
	(.20)	(.53)	(.45)	(.82)	
Variablen bezogen auf digitale Medien					
DigMedEinst	.33*	.16	.06	.26*	.18
		(.20)	(.64)		(.15)
DigMedKomp	.14	.02	-.00	.09	.18
	(.30)	(.85)	(.99)	(.46)	(.15)
DigMedInt	.18	.22	-.03	.05	.13
	(.18)	(.07)	(.81)	(.72)	(.30)
Motivational-emotionale Variablen					
MathMot	.22	.13	.16	.25*	.00
	(.09)	(.28)	(.19)		(.99)
MathSk	.02	-.05	-.15	.12	-.09
	(.87)	(.69)	(.22)	(.32)	(.45)
MathAng	.11	.17	.11	.06	-.05
	(.43)	(.17)	(.39)	(.62)	(.71)
MathSwe	.04	.08	.01	.10	-.14
	(.76)	(.53)	(.94)	(.41)	(.25)
MathInt	.24	.12	.15	.30*	-.03
	(.07)	(.33)	(.23)		(.80)
Feedbackpolung					
HäufFbPos	-.31*	-.16	.11	-.21	-.44**
		(.23)	(.45)	(.13)	
HäufFbNeg	.37**	.34*	.14	.18	.20
			(.31)	(.19)	(.14)

*. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.05 (2-seitig) signifikant.

** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.01 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 57: Rangkorrelationen nach Spearman zwischen Feedbacknutzungshäufigkeit und den Variablen zur Feedbackwahrnehmung, den Leistungsvariablen zu Mzp 1, Variablen bezogen auf digitale Medien und motivational-emotionale Variablen, EG 2

	1	2	3	4	5
1 NutzHäufGes	1				
2 NutzHäufDef	.66**	1			
3 NutzHäufTip	.59**	.40**	1		
4 NutzHäufNsc	.53**	.14	.44**	1	
		(.24)			
5 NutzHäufLös	.36**	.07	.18	.43**	1
		(.58)	(.15)		
Feedbackwahrnehmung					
WKompUnt	.01	.21	.17	.09	-.36**
	(.92)	(.09)	(.16)	(.48)	
WKompErl	.26*	.34**	.22	.08	-.33**
			(.07)	(.55)	
WNützlich	.29*	.24*	.26*	.33**	.08
					(.51)
WVerstUnt	.23	.16	.18	.32**	.02
	(.08)	(.19)	(.15)		(.89)
WKonstUnt	.11	.19	.19	.17	-.16
	(.42)	(.13)	(.12)	(.18)	(.21)
Bruchrechenleistung (Mzp 1)					
LeistGes1	-.37**	-.15	-.24	-.18	-.41**
		(.23)	(.05)	(.14)	
LeistKonz1	-.45**	-.14	-.24*	-.21	-.42**
		(.26)		(.09)	
LeistProz1	-.30*	-.15	-.17	-.14	-.39**
		(.22)	(.17)	(.26)	
Variablen bezogen auf digitale Medien					
DigMedEinst	.20	.11	.09	.19	-.00
	(.14)	(.38)	(.45)	(.12)	(.98)
DigMedKomp	.05	.03	.06	.08	-.00
	(.70)	(.84)	(.65)	(.52)	(.98)
DigMedInt	-.04	.06	-.04	-.05	-.09
	(.79)	(.61)	(.77)	(.68)	(.46)
Motivational-emotionale Variablen					
MathMot	.24	.19	.22	.16	-.00
	(.07)	(.13)	(.08)	(.20)	(.98)
MathSk	.02	-.03	-.15	.05	-.14
	(.90)	(.82)	(.24)	(.70)	(.28)
MathAng	.22	.20	.12	.01	.05
	(.11)	(.11)	(.33)	(.91)	(.68)
MathSwe	.03	.11	-.05	-.03	-.23
	(.81)	(.36)	(.71)	(.83)	(.06)
MathInt	.27*	.20	.17	.21	.00
		(.11)	(.18)	(.09)	(.98)
Feedbackpolung					
HäufFbPos	-.43**	-.11	-.05	-.30*	-.73**
		(.41)	(.70)		
HäufFbNeg	.55**	.39**	.31*	.04	.04
				(.76)	(.75)

*. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.05 (2-seitig) signifikant.

** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.01 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 58: Rangkorrelationen nach Spearman zwischen den Feedbackwahrnehmungsvariablen und den Bruchrechenleistungsdimensionen (Mzp 2)

	1	2	3	4	5	6	7	18
1 WKompUnt	1							
2 WKompErl	.73**	1						
3 WNützlich	.60**	.41**	1					
4 WVerstUnt	.61**	.48**	.54**	1				
5 WKonstUnt	.66**	.58**	.51**	.72**	1			
6 LeistGes2	.19*	.12	-.06	.13	.10	1		
		(.16)	(.46)	(.14)	(.26)			
7 LeistKonz2	.16	.10	-.11	.12	.05	.94**	1	
	(.06)	(.24)	(.19)	(.16)	(.56)			
8 LeistProz2	.19*	.13	-.02	.12	.12	.96**	.80**	1
		(.14)	(.82)	(.16)	(.15)			

*. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.05 (2-seitig) signifikant.
 **. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.01 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 59: Produkt-Moment- Korrelationen nach Pearson zwischen den Subskalen zur Feedbackwahrnehmung und den Subskalen zur Motivation und Emotion

	1	2	3	4	5	6	7	8
1 WKompUnt	1							
2 WKompErl	.73**	1						
3 WNützlich	.60**	.41**	1					
4 WVerstUnt	.61**	.48**	.54**	1				
5 WKonstUnt	.66**	.58**	.51**	.72**	1			
6 IntrMot	.55**	.54**	.37**	.54**	.56**	1		
7 SitInt	.58**	.60**	.40**	.52**	.62**	.85**	1	
8 Bel	-.13	.01	-.15	-.08	-.18*	-.21*	-.19*	1

*. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.05 (2-seitig) signifikant.
 **. Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0.01 (2-seitig) signifikant.

Anhang 13: Erklärung der Feedbacknutzung EG 1

Tabelle 60: Logistische Regressionsanalysen zur Wirkung der Feedbackwahrnehmung auf „Feedbacknutzung EG 1“

	Regressions- koeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)
NutzFb EG 1						
Cox & Snell-R ² = .00, Nagelkerkes-R ² = .00; $\chi^2(7) = 6.95$, p = .84						
Konstante	1.13	1.21	.87	1	.84	.92
WKompUnt	-.09	.44	.04	1	.84	.92
Cox & Snell-R ² = .00, Nagelkerkes-R ² = .00; $\chi^2(5) = 2.53$, p = .88						
Konstante	.75	.99	.58	1	.45	2.13
WKompErl	.06	.41	.02	1	.88	1.06
Cox & Snell-R ² = .02, Nagelkerkes-R ² = .03; $\chi^2(6) = 5.09$, p = .22						
Konstante	2.41	1.32	3.36	1	.07	11.17
WNützlich	-.52	.43	1.42	1	.23	.60
Cox & Snell-R ² = .02, Nagelkerkes-R ² = .02; $\chi^2(6) = 7.78$, p = .25						
Konstante	-.31	1.17	.07	1	.79	.74
WVerstUnt	.47	.45	1.09	1	.30	1.60
Cox & Snell-R ² = .00, Nagelkerkes-R ² = .00; $\chi^2(6) = 3.36$, p = .76						
Konstante	.69	1.13	.37	1	.54	2.00
WKonstUnt	.08	.43	.03	1	.85	1.08
NutzFb EG 1 = Feedbacknutzung der EG 1						

Tabelle 61: Logistische Regressionsanalyse zur Wirkung der „Bruchrechenleistung“ auf „Feedbacknutzung EG 1“

	Regressions- koeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)
NutzFb EG 1						
Cox & Snell-R ² = .00, Nagelkerkes-R ² = .00; $\chi^2(8) = 7.94$, p = .44						
Konstante	1.00	.44	5.05	1	.03	2.71
LeistGes1	-.01	.03	.08	1	.78	.99
Cox & Snell-R ² = .00, Nagelkerkes-R ² = .01; $\chi^2(7) = 7.44$, p = .39						
Konstante	1.10	.48	5.31	1	.02	3.01
LeistKonz1	-.03	.06	.28	1	.60	.97
Cox & Snell-R ² = .00, Nagelkerkes-R ² = .00; $\chi^2(7) = 8.43$, p = .30						
Konstante	.91	.39	5.55	1	.02	2.49
LeistProz1	-.00	.05	.00	1	.95	.10

Tabelle 62: Logistische Regressionsanalyse zur Wirkung der „Variablen bezogen auf digitalen Medien“ auf „Feedbacknutzung EG 1“

	Regressions- koeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)
NutzFb EG 1						
Cox & Snell-R ² = .01, Nagelkerkes-R ² = .02; $\chi^2(4) = 8.39$, p = .08						
Konstante	-.36	1.48	.06	1	.81	.70
DigMedEinst	.38	.44	.73	1	.39	1.46
Cox & Snell-R ² = .00, Nagelkerkes-R ² = .00; $\chi^2(7) = 2.54$, p = .92						
Konstante	.75	1.72	.19	1	.66	2.12
DigMed- Komp	.05	.56	.01	1	.93	1.05
Cox & Snell-R ² = .00, Nagelkerkes-R ² = .00; $\chi^2(7) = 1.90$, p = .97						
Konstante	.76	1.86	.17	1	.68	2.14
DigMedInt	.04	.58	.01	1	.94	1.04

Tabelle 63: Logistische Regressionsanalyse zur Wirkung der motivational-emotionalen Variablen auf „Feedbacknutzung EG 1“

	Regressions- koeffizient B	Standardfehler	Wald	df	Sig.	Exp(B)
NutzFb EG 1						
Cox & Snell-R ² = .01, Nagelkerkes-R ² = .02; $\chi^2(5) = 13.90$, p = .02						
Konstante	-.24	1.18	.04	1	.84	.79
MathMot	.46	.48	.94	1	.33	1.59
Cox & Snell-R ² = .00, Nagelkerkes-R ² = .00; $\chi^2(8) = 10.44$, p = .24						
Konstante	.65	1.10	.35	1	.56	1.91
MathSk	.09	.38	.06	1	.82	1.09
Cox & Snell-R ² = .00, Nagelkerkes-R ² = .00; $\chi^2(8) = 4.64$, p = .80						
Konstante	1.24	.89	1.95	1	.16	3.44
MathAng	-.17	.41	.16	1	.69	.85
Cox & Snell-R ² = .00, Nagelkerkes-R ² = .00; $\chi^2(8) = 26.79$, p < .001						
Konstante	.56	1.16	.23	1	.63	1.75
MathSwe	.12	.41	.09	1	.77	1.13
Cox & Snell-R ² = .00, Nagelkerkes-R ² = .00; $\chi^2(8) = 9.90$, p = .27						
Konstante	.60	1.02	.35	1	.56	1.82
MathIn	.12	.40	.09	1	.76	1.13

Anhang 14: Einflussvariablen auf die Bruchrechenleistung – grafische Darstellungen der Interaktionen

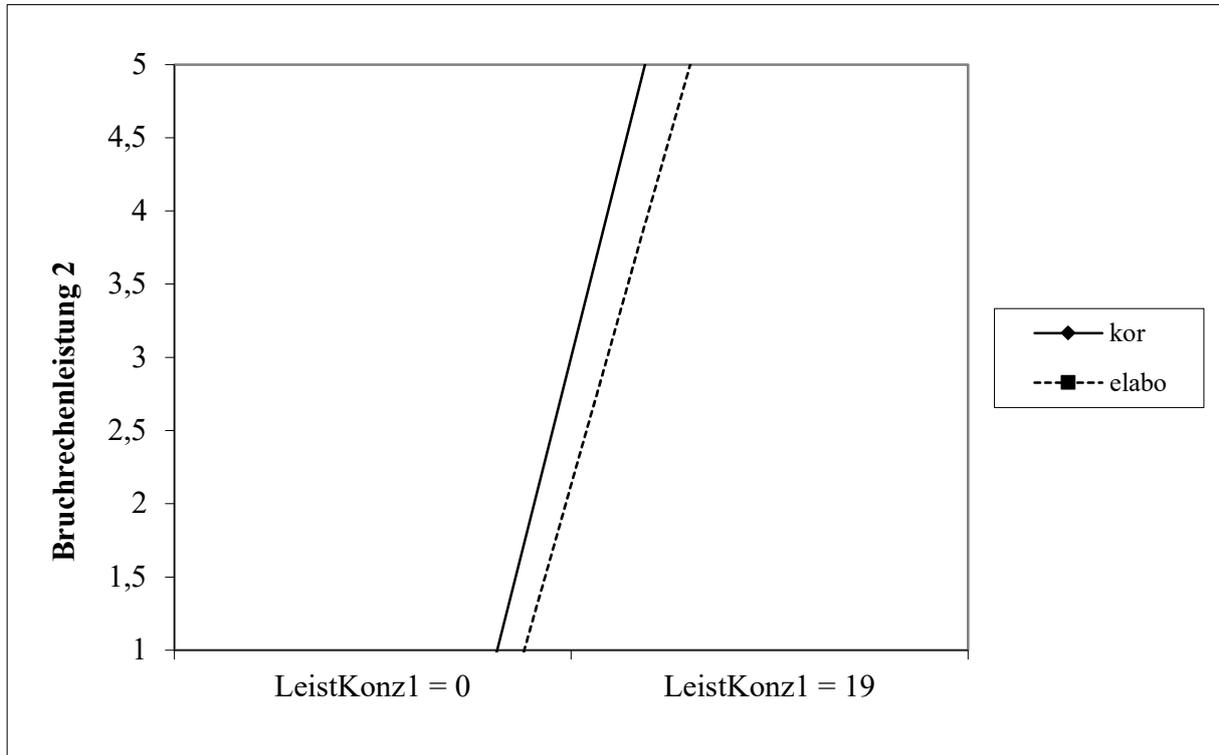


Abbildung 42: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen dem konzeptuellen Wissen zur Bruchrechnung (= LeistKonz1) und der Bruchrechenleistung

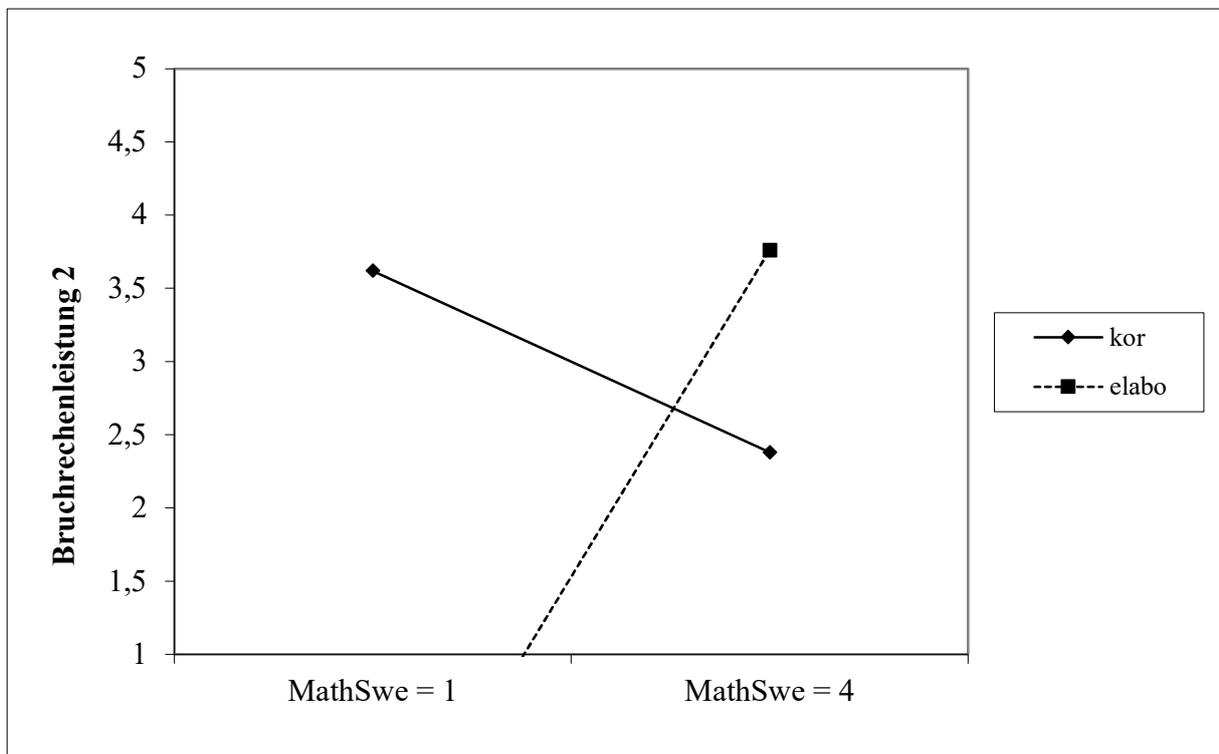


Abbildung 43: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen der Selbstwirksamkeitserwartung bezogen auf das Fach Mathematik (= MathSwe) und der Bruchrechenleistung

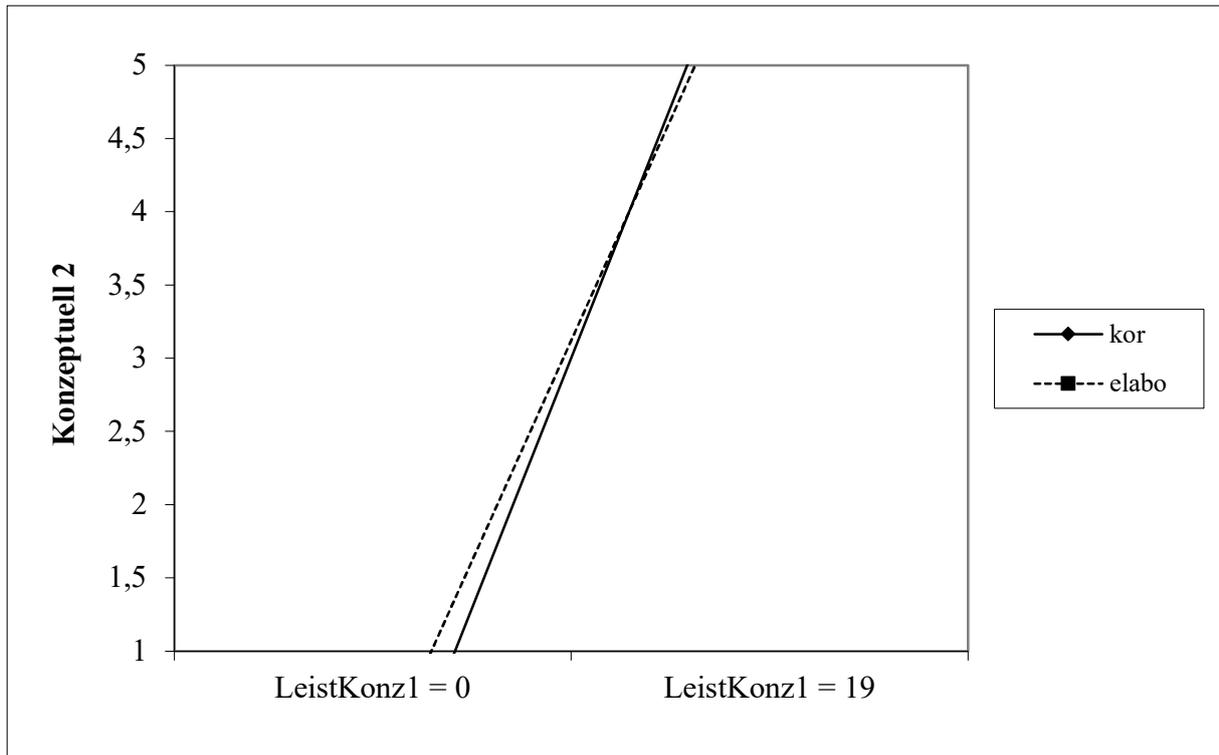


Abbildung 44: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen dem konzeptuellem Wissen zur Bruchrechnung zu Mzp 1 (= LeistKonz1) und dem konzeptuellem Wissen zur Bruchrechnung zu Mzp 2

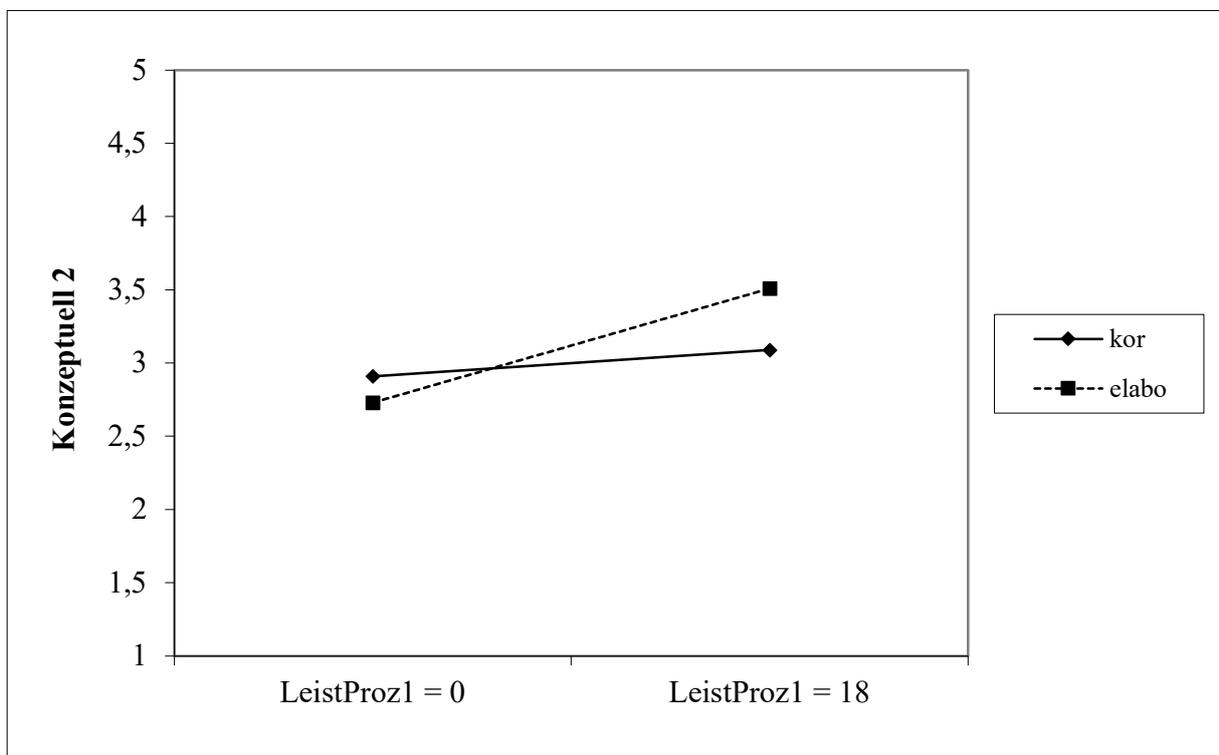


Abbildung 45: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen dem prozeduralem Wissen zur Bruchrechnung (= LeistProz1) und dem konzeptuellem Wissen zur Bruchrechnung

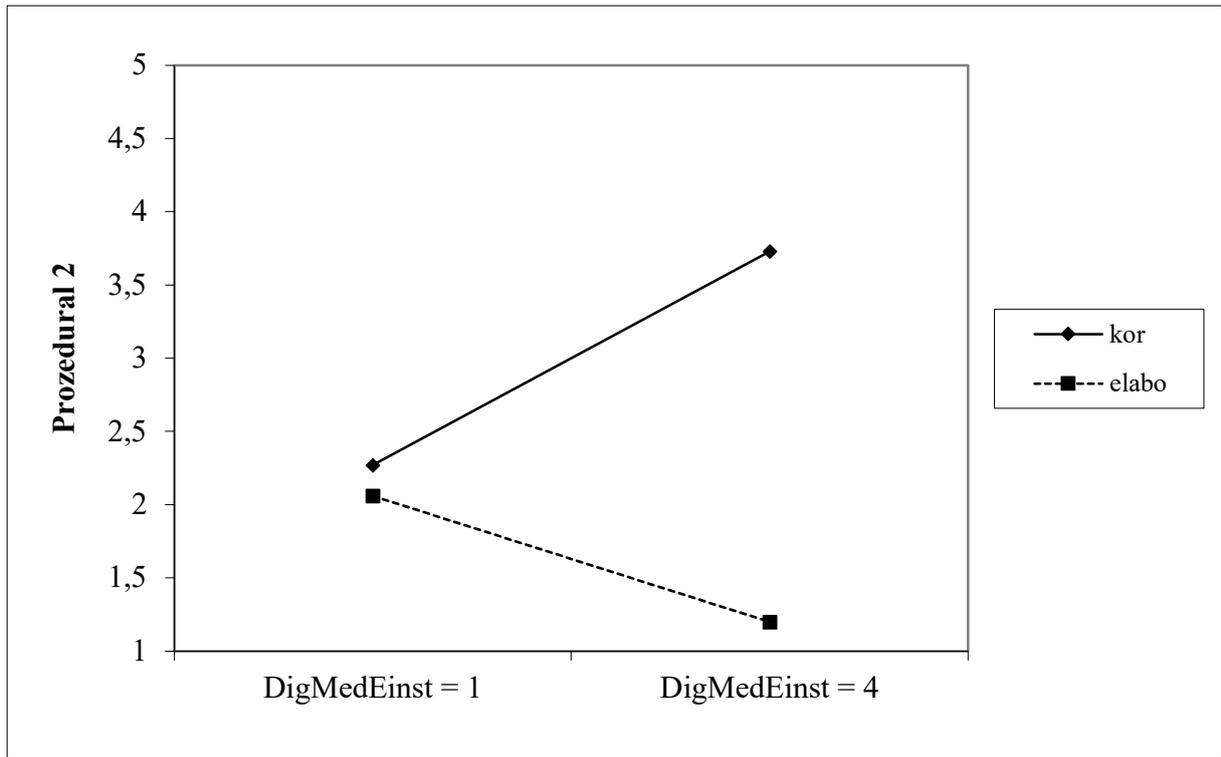


Abbildung 46: Moderierender Einfluss der Feedbackbedingung auf den Zusammenhang zwischen den Einstellungen zu digitalen Medien (= DigMedEinst) und dem prozeduralem Wissen zur Bruchrechnung

Anhang 15: Einflussvariablen auf die Motivation und Emotionen – grafische Darstellungen der Interaktionen

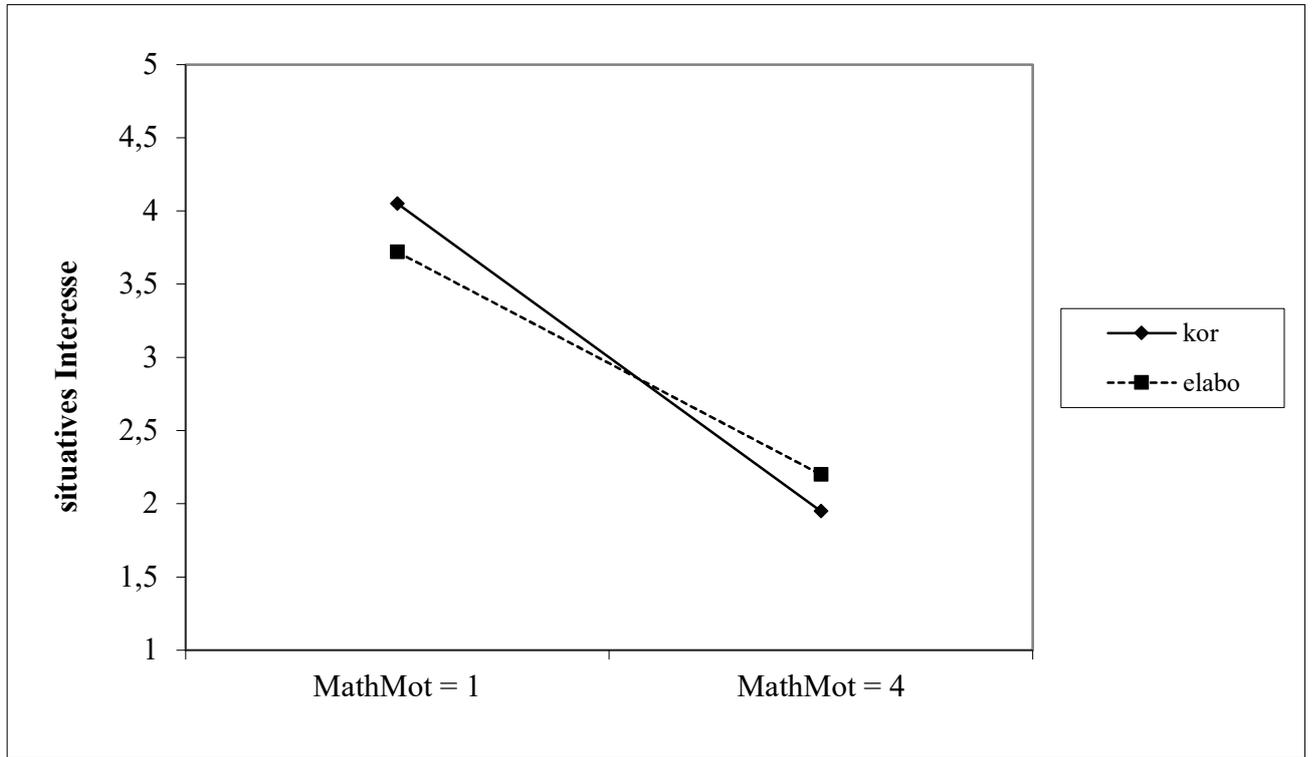


Abbildung 47: Grafische Darstellung der Interaktion zwischen der Motivation bezogen auf das Fach Mathematik und der Feedbackbedingung auf das situative Interesse

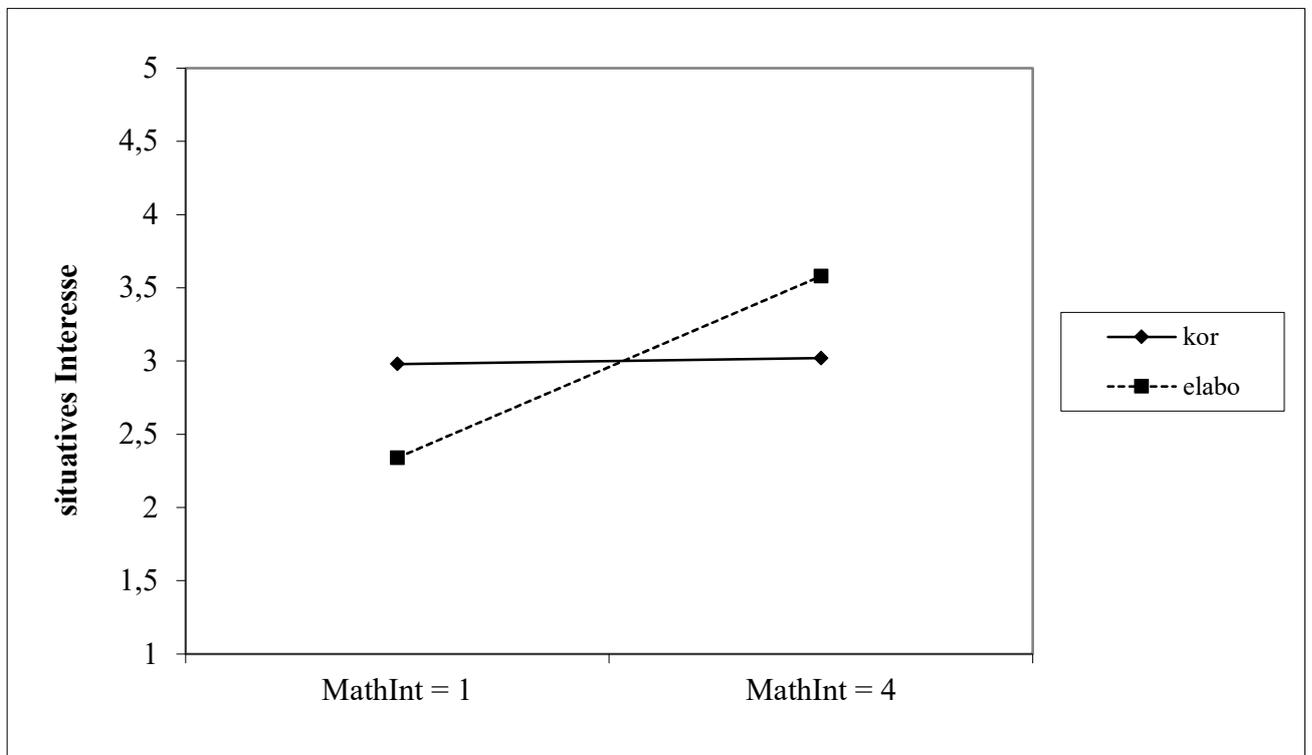


Abbildung 48: Grafische Darstellung der Interaktion zwischen dem Interesse am Fach Mathematik und der Feedbackbedingung auf das situative Interesse

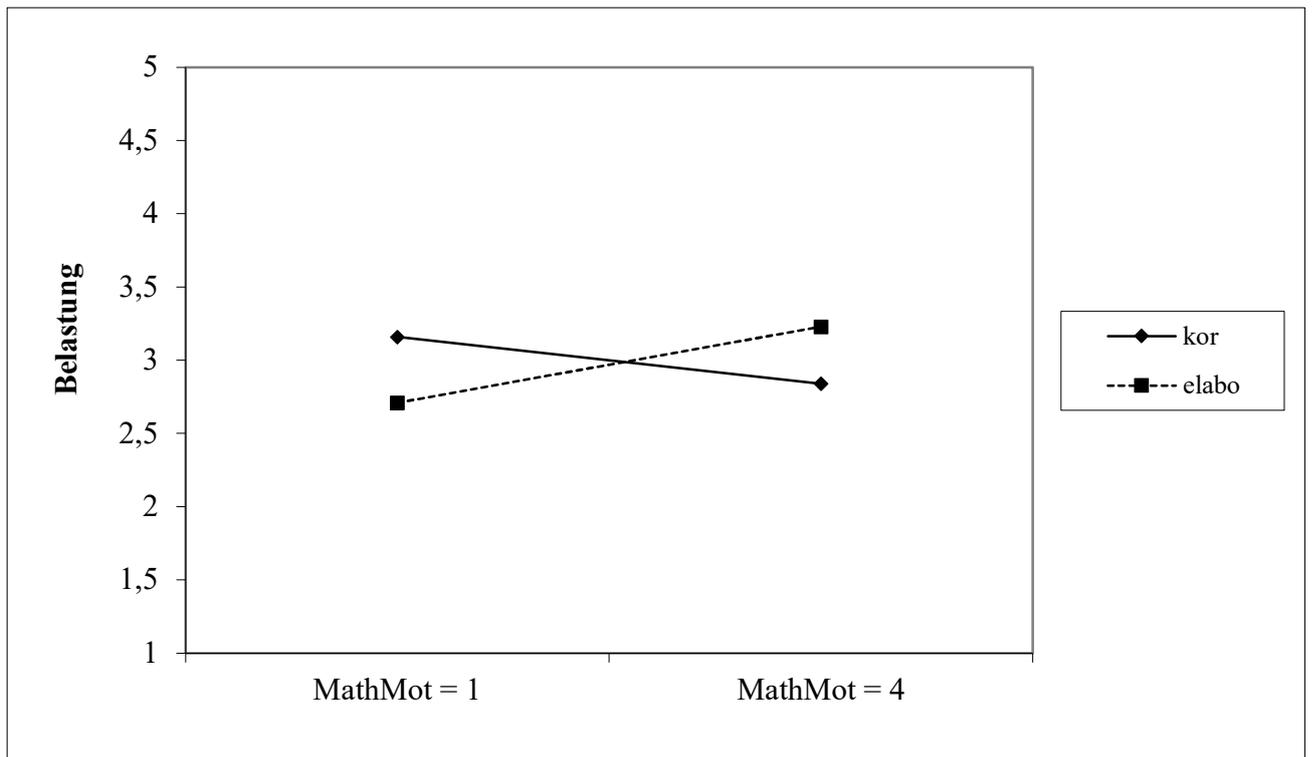


Abbildung 49: Grafische Darstellung der Interaktion zwischen der Motivation bezogen auf das Fach Mathematik und der Feedbackbedingung auf die Belastung

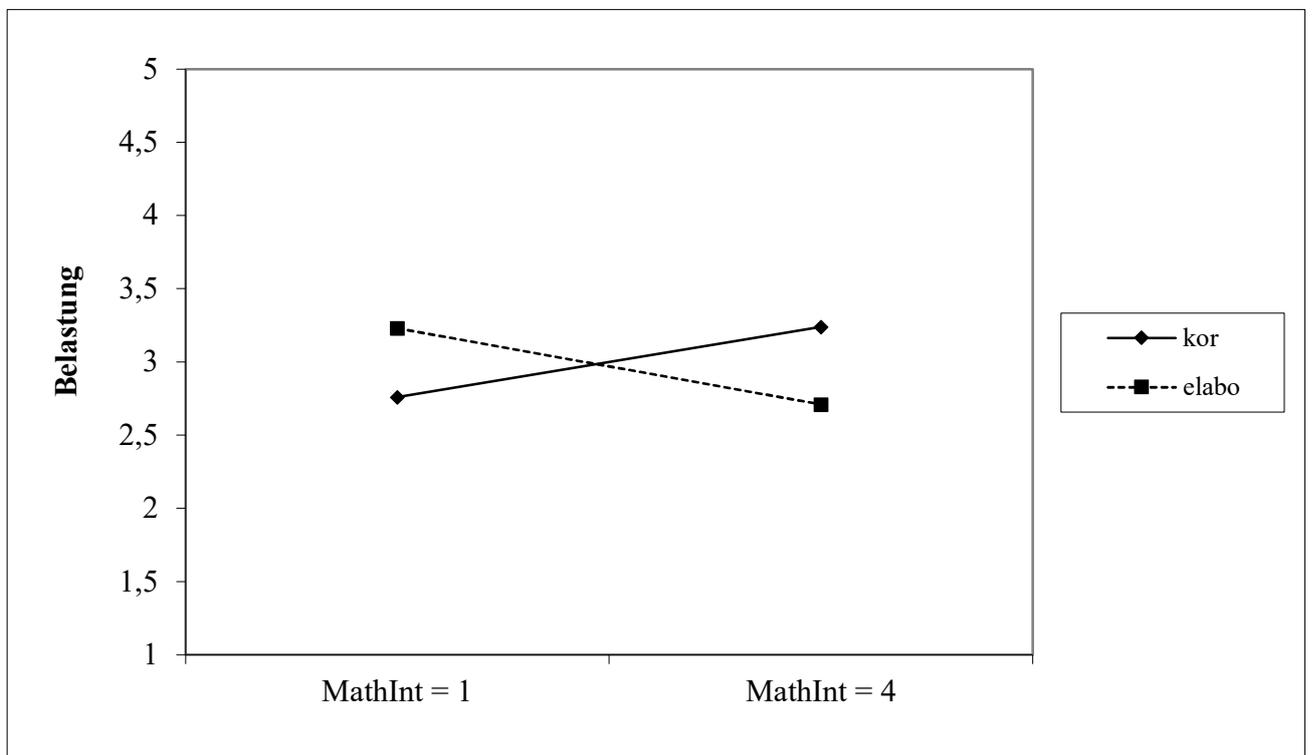


Abbildung 50: Grafische Darstellung der Interaktion zwischen dem Interesse am Fach Mathematik und der Feedbackbedingung auf die Belastung

Anhang 16: Vergleich der Bruchrechenleistung nach Messzeitpunkten

Tabelle 64: Mixed Anova zum Vergleich der Bruchrechenleistung nach Messzeitpunkten

		MW Mzp 1	SD Mzp 1	MW Mzp 2	SD Mzp2	MWdiff	
LeistGes		-1.18	1.88	-0.64	1.70	-0.54	F(1, 135) = 31.96, p < .001, partielles η^2 = .19
Gruppe	EG1	-1.09	1.81	-0.68	1.70	-0.41	F(1, 135) = 0.03, p = .86, partielles η^2 = .00
	EG2	-1.27	1.95	-0.60	1.71	-0.67	
LeistGes*Gruppe							F(1, 135) = 1.15, p = .18, partielles η^2 = .01
LeistKonz		-0.81	1.69	-0.27	1.49	-0.54	F(1, 135) = 26.69, p < .001, partielles η^2 = .17
Gruppe	EG1	-0.63	1.61	-0.27	1.40	-0.36	F(1, 135) = 0.55, p = .46, partielles η^2 = .00
	EG2	-1.00	1.77	-0.28	2.18	-0.72	
LeistKonz*Gruppe							F(1, 135) = 2.88, p = .09, partielles η^2 = .02
LeistProz		-0.06	2.16	0.44	2.08	0.49	F(1, 135) = 22.86, p < .001, partielles η^2 = .15
Gruppe	EG1	-0.06	2.16	0.36	2.18	0.30	F(1, 135) = 1.19, p = .28, partielles η^2 = .01
	EG2	-0.05	2.18	0.51	2.00	-0.46	
LeistProz*Gruppe							F(1, 135) = 0.45, p = .50, partielles η^2 = .00