

Lernen über Evolution:

Eine empirische Betrachtung relevanter Lernendenmerkmale
und anschlussfähiger Fördermaßnahmen



Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Universität zu Köln

vorgelegt von

Roxanne Gutowski

angenommen im Jahr 2025

Zusammenfassung

Globale Herausforderungen wie beispielsweise das durch den Klimawandel bedingte Artensterben fordern zunehmend ein gesamtgesellschaftliches Bewusstsein für biologische Zusammenhänge in Ökosystemen. Diese Zusammenhänge können auf ein Wechselspiel zwischen sich verändernden Umwelteinflüssen und evolutionären Mechanismen zurückgeführt werden. Ein bekanntes Beispiel stellen ko-evolutionäre Entwicklungen zwischen Pflanzen und Bestäuberarten dar, deren ökologische Beziehung aufgrund menschlicher Einflüsse jedoch teilweise gefährdet ist. Ein fundiertes evolutionsbezogenes Wissen und dessen Förderung bildet daher eine Grundlage für informierte Entscheidungen im Umgang mit biologisch-gesellschaftlichen Herausforderungen.

Eine Förderung des evolutionsbezogenen Wissens setzt sowohl eine Kenntnis über relevante Lernendenmerkmale als auch über passende didaktische Strategien voraus. Relevante Lernendenmerkmale (repräsentiert durch personenbezogene Variablen) umfassen dabei nicht nur das (Vor-)Wissen der Lernenden. Sie lassen sich auch in Einstellungen sowie religionsbezogenen und motivationalen Variablen potenziell wiederfinden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Lernendenmerkmale daher in verschiedenen evolutionsbezogenen Kontexten untersucht. Abschließend wird der Blick auf das themenbezogene Wissen und die entsprechenden Einstellungen erweitert, indem die Relevanz ausgewählter Lernendenmerkmale im Kontext von Insekten ergänzend betrachtet wird.

In der ersten Studie wurde untersucht, über welches evolutionsbezogene Wissen $N = 172$ Schüler:innen der Sekundarstufe II in Deutschland verfügen. Hierbei wurden neben dem allgemeinen evolutionsbezogenen Wissen auch die Verfügbarkeit von fachlich adäquaten Konzepten (den sogenannten Schlüsselkonzepten) für die Erklärung evolutionärer Veränderungen sowie das Ausmaß der Anwendung fachlich inadäquater Konzepte erhoben. Darüber hinaus wurden die weiteren für den Lernkontext der Evolution relevanten Lernendenmerkmale evolutionsbezogene Einstellungen (hier die Akzeptanz der Evolution), Religiosität und Konfession (beziehungsweise Glaubensrichtungen) untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die Lernenden über ein eher gering ausgeprägtes evolutionsbezogenes Wissen verfügten und dieses in schwachem bis moderatem Zusammenhang zur Akzeptanz der Evolution stand. Hinsichtlich der Differenzierung zwischen Lernenden verschiedener Konfession ergaben sich Unterschiede für das evolutionsbezogene Wissen, die Verwendung von fachlich adäquaten Konzepten, die Akzeptanz der Evolution sowie die Religiosität. Keine Unterschiede zeigten sich hingegen bei der Verwendung von fachlich inadäquaten Konzepten. Gleichzeitig ergaben die Analysen, dass die

Konfession der Lernenden zwar für ihr Wissen nicht jedoch für ihre Akzeptanz prädiktiv war. Ergebnisse zur Religiosität als potenzieller Prädiktor ergaben ein umgekehrtes Bild.

Die zweite Studie wurde als eine experimentelle Interventionsstudie im Prätest-Posttest-Design konzipiert. Diese hatte zum Ziel die Wirksamkeit verschiedener Instruktionsstrategien (gestufte Lernhilfen, gestufte Prompts und gestufte Lösungsbeispiele) für das Lernen über Evolution zu untersuchen. Für die Analysen wurden personenbezogene Variablen zum Lernerfolg, zu den Selbstwirksamkeitserwartungen sowie zur intrinsischen Motivation berücksichtigt. Die Schüler:innen der Sekundarstufe II ($N = 108$) wurden entsprechend der drei Instruktionsstrategien in drei Gruppen eingeteilt. Bei der Bearbeitung des Lernmaterials standen ihnen die Instruktionsstrategien als optionale Lernhilfen zur Verfügung, die sie bei Bedarf nutzen konnten. Die Analysen ergaben keine signifikanten Unterschiede in der Wirksamkeit der drei Instruktionsstrategien hinsichtlich dem Lernerfolg, der Veränderung der themenbezogenen Selbstwirksamkeitserwartungen und der intrinsischen Motivation bei der Bearbeitung der Lerneinheit. In anschließenden Vergleichen wurde erkennbar, dass Lernende, die die optionalen Lernhilfen genutzt hatten, im Prätest über ein geringeres Vorwissen, geringere Selbstwirksamkeitserwartungen sowie eine geringere intrinsische Motivation verfügten als Lernende, die diese nicht genutzt hatten. Außerdem wiesen sie bei der Bearbeitung der Lerneinheit eine geringere intrinsische Motivation in dem Teilindikator Interesse/Freude sowie einen geringeren Lernerfolg im Posttest auf.

Evolutionsbezogenes Wissen stellt die Grundlage für ein Verständnis der ökologischen Bedeutung von Arten und ihrer Vielfalt dar. Diese Zusammenhänge werden am Beispiel der Insekten auf vielfältige Weise deutlich. Eine Kenntnis über die Artenvielfalt und Lebensweisen der Insekten sowie eine Sensibilisierung und Wertschätzung ihrer ökologischen Bedeutung ist für den Schutz der Artenvielfalt unerlässlich. Ergänzend zur ersten Studie erweitert die dritte Studie den Blick auf relevante Lernendenmerkmale im Biologieunterricht, indem sie insektenbezogenes Wissen und Einstellungen bei $N = 574$ Lernenden unterschiedlichen Bildungsstandes und Geschlechts ($n = 365$ weibliche Lernende, $n = 190$ männliche Lernende) querschnittlich untersucht. Für die Unterscheidung des Bildungsstandes wurden die Lernenden in Schüler:innen zu Beginn der Sekundarstufe I (Erprobungsstufe; $n = 82$), Schüler:innen am Ende der Sekundarstufe I ($n = 109$), Schüler:innen in der Sekundarstufe II ($n = 171$), Biologielehramtsstudierende im Bachelorstudium ($n = 93$) und Biologielehramtsstudierende im Masterstudium ($n = 119$) eingeteilt. Die Ergebnisse wiesen auf ein insgesamt eher hohes insektenbezogenes Wissen hin, das mit steigendem Bildungsstand tendenziell zunahm. Auch hinsichtlich der

Zusammenfassung

insektenbezogenen Einstellungen ergaben sich Unterschiede bei denen insbesondere Schüler:innen der Erprobungsstufe und Studierende des Lehramts Biologie im Bachelor- und Masterstudium positivere Einstellungen zeigten. Zudem wiesen männliche Lernende positivere Einstellungswerte als weibliche Lernende auf. Geschlechterbezogene Unterschiede hinsichtlich des Wissens wurden nicht festgestellt. Der Zusammenhang zwischen dem insektenbezogenen Wissen und den insektenbezogenen Einstellungen stellte sich als moderat bis stark positiv heraus.

Die Ergebnisse dieser drei Studien weisen auf die potenzielle Relevanz ausgewählter Lernendenmerkmale für das biologiebezugene Lernen mit Fokus auf dem Lernkontext der Evolution hin. Diese betreffen einerseits das vorhandene Wissen und damit im Zusammenhang stehende Einstellungen sowie ihre Bedeutung für den Lernerfolg. Auch liefern die Ergebnisse erste Hinweise auf die Wirksamkeit von Instruktionsstrategien, wenn diese als optionale Lernhilfen zur Verfügung gestellt werden.

Abstract

Global challenges such as species extinction caused by climate change increasingly demand public awareness of biological interrelationships in ecosystems. These interrelationships can be traced back to an interplay between changing environmental influences and evolutionary mechanisms. A well-known example is the co-evolutionary development between plants and pollinator species, whose ecological relationship is partially threatened by human influences. A sound knowledge about evolution and its promotion therefore forms the basis for informed decisions when dealing with biological and social challenges.

Promoting biological or evolutionary knowledge requires knowledge of relevant learner characteristics and appropriate teaching strategies. Relevant learner characteristics include the learners' prior knowledge, their attitudes, religious and motivational variables. This study therefore examines learner characteristics in various biological contexts. The focus is on learning about evolution but is supplemented by analyses in the context of insects.

The first study examined the evolutionary knowledge of $N = 172$ upper secondary school students in Germany. In addition to general evolutionary knowledge, the study also assessed the availability of key concepts for explaining evolutionary changes and the extent to which misconceptions were used. In addition, further learner characteristics relevant to the context of evolution were examined, such as attitudes towards evolution (here represented as acceptance of evolution), religiosity, and denomination. The results show that the learners had rather low knowledge about evolution and that this was weakly to moderately correlated with their acceptance of evolution. Differences emerged in terms of knowledge of evolution, the use of key concepts, acceptance of evolution, and religiosity with regard to different denominations. However, no differences were found in the use of misconceptions. Further analyses showed that the learners' denomination was predictive of their knowledge but not of their acceptance. Contrary, religiosity was predictive of learners' acceptance but not of their knowledge.

The second study is an experimental intervention study with a pretest-posttest design. Its aim was to investigate the effectiveness of different instructional strategies (incremental scaffolds, incremental prompts, and incremental worked-out examples) for learning about evolution. Variables relating to learning performance, self-efficacy expectations, and intrinsic motivation were considered for the analyses. Secondary school students ($N = 108$) were divided into three groups according to the three instructional strategies. These were available to them as optional support while working on the learning material. The analyses revealed no significant

differences in the effectiveness of the three instructional strategies in terms of learning performance, changes in learners' self-efficacy expectations, and intrinsic motivation when working through the learning unit. However, subsequent comparisons between learners who used the optional support showed lower prior knowledge, lower self-efficacy expectations, and lower intrinsic motivation in the pretest than learners who did not use the optional support. They also showed lower intrinsic motivation in the sub-indicator interest/enjoyment when working through the intervention and lower learning performance in the post-test.

Knowledge about evolution provides the basis for understanding the ecological significance of species and their diversity. The example of insects illustrates these relationships. Knowledge about insect biodiversity and lifestyles, as well as awareness and appreciation of their ecological significance, is essential for the protection of biodiversity. The third study broadens the perspective on relevant learner characteristics in biology education by examining insect-related knowledge and attitudes among $N = 574$ learners of different education levels ($n = 82$ students of the first two years of lower secondary school, $n = 109$ students of the last two years of lower secondary school; $n = 171$ students of the upper secondary school; $n = 93$ pre-service biology teachers in the bachelor's program; $n = 119$ pre-service biology teachers in the master's program) and with regard to gender ($n = 365$ female learners, $n = 190$ male learners). The results indicated a generally moderate level of insect-related knowledge, which tended to increase with higher levels of education. Differences were also found in insect-related attitudes, with students in the at the beginning of lower secondary school and biology teacher training students in bachelor's and master's programs showing more positive attitudes. In addition, male learners had more positive attitudes. No gender-related differences in knowledge were found. The correlation between insect-related knowledge and insect-related attitudes was found to be moderate to strongly positive.

The results of these three studies point to the potential relevance of learner characteristics for biology education with a focus on evolution education. They relate to existing knowledge and corresponding attitudes, as well as their significance for learning performance. The results also provide initial indications of the effectiveness of instructional strategies when these are provided as optional support.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand	4
2.1 Fachliche Anforderungen beim Lernen über Evolution	4
2.2 Die Bedeutung evolutionsbezogener Einstellungen für das evolutionsbezogene Wissen	12
2.3 Die Vereinbarkeit von religiösen Vorstellungen und evolutionsbezogenem Wissen	13
2.4 Die Vermittlung evolutionsbezogenen Wissens	15
2.5 Die Wirksamkeit von Instruktionsstrategien in heterogenen Lerngruppen	18
3 Fragestellung	22
4 Projektübersicht	25
5 Eigene empirische Studien	27
5.1 An exploratory study on students' denominations, personal religious faith, knowledge about, and acceptance of evolution (Studie I)	27
5.1.1 <i>Vorstellung der Studie</i>	27
5.1.2 <i>Eigenanteile</i>	28
5.1.3 <i>Originalmanuskript zu Studie I</i>	29
5.2 Effectiveness and use of optional scaffolds: an intervention study in biology lessons on phylogenetic trees (Studie II)	64
5.2.1 <i>Vorstellung der Studie</i>	64
5.2.2 <i>Eigenanteile</i>	67
5.2.3 <i>Originalmanuskript zu Studie II</i>	68
5.3 Do future biology teachers bug out with higher insect-related knowledge and more positive attitudes? A comparison of different education levels (Studie III)	98
5.3.1 <i>Vorstellung der Studie</i>	98
5.3.2 <i>Eigenanteile</i>	101
5.3.3 <i>Originalmanuskript zu Studie III</i>	102

6 Gesamtdiskussion	122
6.1 Die Bedeutung personenbezogener Variablen für das evolutionsbezogene Wissen	123
6.2 Die Förderung des evolutionsbezogenen Wissens	128
6.3 Limitationen.....	132
6.4 Implikationen und Ausblick	135
7 Fazit.....	137
Literaturverzeichnis	138

1 Einleitung

*„Die biologische Evolution ist das vereinigende,
übergreifende Erklärungsprinzip der Lebenswissenschaften.“*

(Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, 2017)

In das Erklärungsgebiet der biologischen Evolution fällt eine Vielzahl gesellschaftlich relevanter Fragestellungen, die ihren Ursprung in biologischen Prozessen haben. Dazu gehören unter anderem die Entwicklung und Anpassung von Impfstoffen, die Bildung von Antibiotikaresistenzen und ihre Folgen sowie die wissenschaftliche Betrachtung möglicher kurzfristiger Anpassungen von Lebewesen an Veränderungen durch den Klimawandel (Nadeau & Urban, 2019; Smith, 2010; Wiens et al., 2019). Ein Verständnis der biologischen Evolution und ihrer Mechanismen beschränkt sich daher nicht nur auf den Biologieunterricht, sondern ist auch für das Verständnis aktueller ökologischer Probleme, wie das durch den Klimawandel bedingte Artensterben, relevant (Europarat, 2007; Smith, 2010). Da (Biologie-)Unterricht zum Ziel hat, Lernende zur aktiven und informierten Teilhabe an der Gesellschaft zu befähigen, ist der Aufbau von evolutionsbezogenem Wissen essenziell. Bisherige Studien zeigen jedoch, dass Lernende der weiterführenden Schulen verschiedener Klassenstufen in Deutschland über ein eher geringes bis moderates evolutionsbezogenes Wissen verfügen (Beniermann 2019; Fenner 2013; Kuschmierz 2020a, 2020b; Lammert 2012).

Aufgrund ihrer komplexen Funktion als Erklärungsprinzip (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, 2017) stellt sich das Lernen über die biologische Evolution für Lernende häufig als herausfordernd dar. Diese Herausforderungen sind vielfältig und können sich auf das Verständnis der Wirkungsmechanismen natürlicher Selektion (Nehm et al., 2012; Opfer et al., 2012) und ihnen zugrundeliegenden überfachlichen Konzepten (z. B. zu zeitlichen Dimensionen im Verlauf von Evolutionsprozessen; Göransson et al., 2020; Tibell & Harms, 2017) beziehen. Sie können sich im Auftreten fachlich inadäquater Vorstellungen zeigen (z. B. Graf & Hamdorf, 2012; Mayr, 1982; Opfer et al., 2012) oder sind in für Lernende ungewöhnlichen Darstellungsweisen wie beispielsweise in phylogenetischen Stammbäumen begründet (Gregory, 2008; Huber & Stallhofer, 2010; Schramm, 2022).

Angemessene Herausforderungen sind für den Lernprozess jedoch von großer Bedeutung, da sie nach Vygotsky (1978) ein Lernen in der sogenannten *Zone der nächsten Entwicklung* (Zone of Proximal Development) ermöglichen. Diese verbildlicht das Lernpotenzial von Lernenden und ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Lernstand, den Lernende in einem angeleiteten

und einem selbstständigen Lösungsprozess erreichen können. Übersteigt eine Aufgabe das bisherige Vermögen von Lernenden, kann dies zu Überforderung führen, wodurch Lernen in der Zone der nächsten Entwicklung verhindert wird. Liegt die Anforderung einer Aufgabe hingegen unter dem aktuellen Stand der Lernenden, kann der Lernprozess aufgrund von Unterforderung ebenfalls gestört sein (Vygotsky, 1978). Die Aufgabe von Lehrenden besteht demnach darin, die optimale Balance zwischen Unter- und Überforderung zu finden. Da die Bedürfnisse der Lernenden entsprechend ihrer jeweiligen Voraussetzungen (z. B. hinsichtlich ihres Vorwissens) individuell verschieden sind, können mit einem gleichartig gestalteten Material in der Regel nicht alle Lernenden gleichermaßen unterstützt werden. Um dieser Problematik entgegenzuwirken bieten sich sogenannte gestufte Lernhilfen an. Sie ermöglichen es Lehrenden das gleiche Arbeitsmaterial in heterogenen Lerngruppen bei allen Lernenden einzusetzen (Hänze et al., 2010; Hänze et al., 2007). Dies ist durch die Bereitstellung von optionalen Lernhilfen möglich, die den Schwierigkeitsgrad einer Aufgabe schrittweise abbauen und über deren Nutzung die Lernenden selbstständig entscheiden (Arnold et al., 2017; Hänze et al., 2007). Nach bisherigem Kenntnisstand wurde der Einsatz gestufter Lernhilfen zur Förderung des evolutionsbezogenen Wissensaufbaus in heterogenen Lerngruppen bislang noch nicht wissenschaftlich geprüft. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ihre Wirksamkeit zur Förderung des evolutionsbezogenen Wissens untersucht.

In der biologiedidaktischen Forschung zum Thema Evolution haben sich evolutionsbezogene Einstellungen als bedeutsamer Gegenspieler zum evolutionsbezogenen Wissen erwiesen (z. B. Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020). Als positive Ausprägungsform der Einstellung wird daher die Akzeptanz der Evolution für vielfältige Gruppen, beispielsweise Personen mit verschiedenen Bildungsständen, untersucht (Beniermann, 2019; Großschedl et al., 2018). Gleichzeitig ist die aktuelle Befundlage aufgrund unterschiedlicher Operationalisierungen des Konstruktes Akzeptanz, zum Beispiel durch eine fehlende inhaltliche Abgrenzung zum Konstrukt Wissen, uneinheitlich, sodass weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich dieser beiden Konstrukte und ihrem Zusammenhang besteht (Barnes et al., 2019; Dunk et al., 2019; Kuschmierz et al., 2021; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020). Da das Wissen und die Akzeptanz bei Lernenden an weiterführenden Schulen dazu tendieren in schwach positivem Zusammenhang zu stehen, spielt die Akzeptanz der Evolution eine potenziell lernrelevante Rolle (Beniermann, 2019; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020; Lammert, 2012). Die bisherige Forschung hat hierbei für Deutschland vor allem einen Fokus auf Lernende der Sekundarstufe I sowie angehende Biologielehrkräfte gelegt (z. B. Fenner, 2013; Großschedl et al., 2018; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020; Lammert, 2012). Eine explizite Untersuchung dieses Zusammenhangs für

Lernende der Sekundarstufe II in Deutschland wird daher in dieser Arbeit aufgegriffen (siehe Beniermann, 2019 für bisherige Ergebnisse in Klasse 11).

Aufgrund von möglichen wahrgenommenen Konflikten stellt sich die Religiosität einer Person als weiterer relevanter Faktor dar, der sich insbesondere auf die Akzeptanz der Evolution negativ auswirken kann (z. B. Barone et al., 2014). Da die Zugehörigkeit zu einer Glaubensgemeinschaft das religiöse Weltbild einer Person mitbestimmen, wird zunehmend auch die Rolle der konfessionellen Zugehörigkeit in diesem Kontext betrachtet. Bisherige Studien weisen auf Unterschiede zwischen den Angehörigen verschiedener Konfessionen beziehungsweise Glaubensrichtungen hin, die jedoch je nach Region unterschiedlich ausfallen können (Clément, 2015; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020). Diese Arbeit analysiert daher die Passung der Operationalisierung zur Messung von Zusammenhängen mit der Akzeptanz der Evolution sowie mit dem evolutionsbezogenen Wissen für deutsche Stichproben.

Damit Lernangebote künftig besser an Lernende angepasst werden können, hat diese Arbeit zum Ziel zu untersuchen, welche Lernendenmerkmale für das evolutionsbezogene Wissen und dessen Förderung bedeutsam sind. Dazu werden mögliche personenbezogene Variablen (z. B. die Akzeptanz der Evolution) analysiert, die in diesem Themenfeld potenziell für heterogene Lernvoraussetzungen sorgen könnten und eine methodische Umsetzung zur Förderung aller Lernenden (z. B. durch gestufte Lernhilfen) erprobt.

Um sich den Fragen anzunähern, wie evolutionsbezogenes Wissen in heterogenen Lerngruppen wirksam gefördert werden kann und welche Lernendenmerkmale dabei berücksichtigt werden sollten, werden im ersten Teil des theoretischen Hintergrundes (**Kapitel 2.1 – 2.3**) relevante Voraussetzungen auf Seite der Lernenden betrachtet. Neben der Darstellung der Eigenschaften des evolutionsbezogenen Wissens wird dieses in Relation zu weiteren personenbezogenen Variablen wie den Bildungsstand, evolutionsbezogene Einstellungen (hier Akzeptanz der Evolution) und religionsbezogene Variablen gesetzt. Im zweiten Teil des theoretischen Hintergrundes wird der Forschungsstand hinsichtlich verschiedener didaktischer Strategien zur Förderung evolutionsbezogenen Wissens vorgestellt (**Kapitel 2.4**) und die Wirksamkeit von ausgewählten Instruktionsstrategien für das (evolutionsbezogene) Lernen beleuchtet (**Kapitel 2.5**). Anschließend werden die untersuchten Fragestellungen aus dem zuvor präsentierten Forschungsstand abgeleitet (**Kapitel 3**) und die verschiedenen Studien dieser Dissertation vorgestellt (**Kapitel 4**). Das **Kapitel 5** enthält die einzelnen Studien dieser Dissertation, einschließlich einer entsprechenden Kurzvorstellung der jeweiligen Studie. Inhaltlich schließt die Dissertation mit einer übergeordneten Diskussion der zentralen Ergebnisse aus den Studien ab (**Kapitel 6**).

2 Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand

Im Folgenden werden theoretische Grundlagen für das Lernen über Evolution, relevante Lernendenmerkmale sowie Möglichkeiten zur Förderung des evolutionsbezogenen Lernens anhand von Instruktionsstrategien vorgestellt und in den aktuellen Forschungsstand eingeordnet.

Im ersten Teil wird zunächst aus fachlicher sowie fachdidaktischer Perspektive geklärt, welche fachlich adäquaten Konzepte für evolutionsbezogenes Wissen in den Bereichen der Mikro- und Makroevolution grundlegend sind und worin Schwierigkeiten bei der Anwendung dieses Wissens liegen können. Anschließend wird die Rolle der evolutionsbezogenen Einstellungen in ihrer positiven Ausprägung, der Akzeptanz der Evolution, für das evolutionsbezogene Wissen dargelegt. Außerdem wird das Verhältnis von religiösen Vorstellungen zu Erkenntnissen der Evolutionsforschung und der Akzeptanz der Evolution vorgestellt.

Der zweite Teil gibt einen Überblick über empfohlene sowie bereits erprobte didaktische Strategien bei der Vermittlung evolutionsbezogenen Wissens. Hierbei werden sowohl Ansätze zur Thematisierung möglicher wahrgenommener Konflikte mit religiösen Vorstellungen sowie zur gezielten Förderung des evolutionsbezogenen Fachwissens vorgestellt. Anschließend werden Erkenntnisse zum Einsatz von Instruktionsstrategien beim Lernen über Evolution auf die Bereitstellung von gestuften Lernhilfen als weitere Instruktionsstrategie übertragen und ihre potenziell erhöhte Eignung für das Lernen über Evolution in heterogenen Lerngruppen hergeleitet.

2.1 Fachliche Anforderungen beim Lernen über Evolution

Die biologische Evolution¹ umfasst Prozesse, die die Veränderungen der Eigenschaften von Populationen über mehrere Generationen beschreiben. Sie ist daher von der kosmischen und chemischen Evolution abzugrenzen, die die Entstehung des Universums sowie erster organischer Moleküle und die damit zusammenhängende Entstehung des Lebens erklären (Graf & Hamdorf, 2012). Zudem wird in der biologiedidaktischen Forschung häufig zwischen dem Wissen zu Veränderungsprozessen auf Ebene der Mikro- und der Makroevolution unterschieden, da diese unterschiedliche Anforderungen an Lernende stellen (Catley, 2006; Nadelson & Southerland, 2009). Die *Mikroevolution* erklärt evolutionäre Veränderungsprozesse auf der innerartlichen Ebene und über geologisch kurze Zeiträume, beispielsweise zwischen Generationen. Diese Veränderungen sind auf Variation innerhalb einer Art oder Population zurückzuführen, die durch die sogenannten Evolutionsmechanismen Mutation, Rekombination, Gendrift

¹ Im Folgenden wird die Bezeichnung Evolution synonym für die biologische Evolution verwendet.

und natürliche Selektion bedingt sind und in der Folge Veränderungen in den Allelhäufigkeiten innerhalb einer Population bewirken (Campbell et al., 2009; Hautmann, 2020). Die *Makroevolution* hingegen umfasst evolutionäre Veränderungsprozesse, die sich auf die intraspezifische Variation auswirken (Hautmann, 2020). Diese zwischenartlichen Veränderungen entwickeln sich meist über geologisch große Zeiträume hinweg (Campbell et al., 2009) und können in der Entstehung neuer taxonomischer Gruppen münden (Erwin, 2000; Hautmann, 2020). Sie werden unter anderem durch das kontinuierliche Wirken mikroevolutionärer Prozesse wie der natürlichen Selektion angetrieben und sind darüber hinaus durch weitere zufällige Ereignisse und Prozesse (z. B. Umweltkatastrophen) sowie intraspezifische Konkurrenz bedingt (Göransson et al., 2020; Hautmann, 2020).

Evolutionsbezogenes Wissen weist zudem einen hohen Vernetzungsgrad auf, der sich unter anderem im Kernlehrplan für die gymnasiale Oberstufe in Nordrhein-Westfalen widerspiegelt. Die Evolution bildet hier mit der Genetik ein gemeinsames Inhaltsfeld, wodurch beispielsweise die Vermittlung phylogenetischer Verwandtschaftsverhältnisse – auch auf Basis molekularbiologischer Erkenntnisse – ermöglicht wird (Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2022). Als Erklärungsprinzip für biologische Phänomene (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, 2017) wird daher eine inhaltliche Vernetzung evolutionsbezogener Inhalte und Kompetenzen mit weiteren Inhaltsfeldern wie der Ökologie ebenfalls angestrebt (Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2022).

Die Vielschichtigkeit des evolutionsbezogenen Wissens ist nicht nur in seinen fachlichen Merkmalen begründet. In der allgemeinen Lernforschung wird zudem zwischen verschiedenen Dimensionen des Wissens unterschieden, zu denen unter anderem das deklarative sowie das konzeptuelle Wissen gehören (Anderson et al., 2001). Das *deklarative Wissen* beschreibt das domänenspezifische (z. B. biologische) Faktenwissen und bildet die Grundlage für ein vertieftes Verständnis (biologischer) Prozesse (Anderson et al., 2001; Bloom, 1956). Ein solches vertieftes Verständnis wird durch das komplexere *konzeptuelle Wissen* erlangt, welches es ermöglicht Bezüge zwischen Informationseinheiten (z. B. des deklarativen Wissens) herzustellen (Anderson et al., 2001). Evolutionsbezogenes Wissen stellt in diesem Sinne ein mehrdimensionales Konstrukt dar, dem verschiedene Konzepte zugrunde liegen (Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020).

In der fachdidaktischen Forschung zum Verständnis der natürlichen Selektion wurden sieben *Schlüsselkonzepte* (Key Concepts) identifiziert, die zur fachlich adäquaten Erläuterung evolutionärer Veränderungen durch natürliche Selektion notwendig sind. Drei dieser Konzepte

werden dabei als essenziell für das Verständnis dieser Veränderungen gesehen und daher als *Kernkonzepte* (Core Concepts) bezeichnet (Nehm & Ha, 2011). Zu den Kernkonzepten zählen (Nehm & Ha, 2011; Nehm et al., 2010; Opfer et al., 2012):

- Das Vorhandensein sowie die Ursachen für *Variation* zwischen Individuen, beispielsweise durch Mutation oder Rekombination;
- Die *Vererbbarkeit* von Variation durch die unterschiedliche Weitergabe genetischer Information an die Nachfahren;
- Das unterschiedliche Überleben von Individuen und ihre Reproduktion durch ihre *individuelle Fitness* beziehungsweise Anpassung.

Vertiefende Erklärungen liefern die weiteren vier Schlüsselkonzepte (Bishop & Anderson, 1990; Federer et al., 2015; Großschedl et al., 2018; Nehm et al., 2010; Nehm & Reilly, 2007; Opfer et al., 2012):

- Die *Konkurrenz* zwischen Individuen um Ressourcen;
- Die *Überproduktion* von Nachkommen;
- Die umweltbedingte *Limitation von Ressourcen* beispielsweise bezüglich des Nahrungsangebots;
- Die *Veränderung der Population* über Generationen hinsichtlich der Häufigkeit der Variation und ihrer Verteilung.

Weiterhin sind für ein Verständnis evolutionärer Veränderungsprozesse die sogenannten *Schwellenkonzepte* grundlegend. Diese bieten den Lernenden die Möglichkeit komplexe Zusammenhänge aus einer erweiterten Perspektive zu sehen (Meyer & Land, 2003). Nach Meyer und Land (2005) sind ihnen daher verschiedene Eigenschaften inhärent: Einerseits sind Schwellenkonzepte zwar schwer zu erlernen (sie sind *mühsam*), andererseits werden sie einmal gelernt nicht so leicht wieder verlernt (sie sind *irreversibel*). Zudem eröffnen sie Lernenden durch die erlangten Erkenntnisse neue Sichtweisen auf ein Thema (sie wirken *transformativ*) und zeigen ihnen zuvor verborgene Verbindungen auf (sie wirken *integrativ*, Meyer & Land, 2005).

Im Bereich der Evolution werden derzeit folgende vier Schwellenkonzepte beforscht: das Verständnis von Zufall und Wahrscheinlichkeit sowie zeitlicher und räumlicher Skalen (z. B. Göransson et al., 2020; Tibell & Harms, 2017). Die Bedeutsamkeit der Schwellenkonzepte wird oftmals anhand des Schlüsselkonzeptes *Variation* exemplarisch veranschaulicht wobei ebenfalls Verbindungen zu weiteren Schlüsselkonzepten hergestellt werden können (z. B. Tibell & Harms, 2017):

- Der Ursprung der Variation ist vom Zufall bestimmt und äußert sich beispielsweise im Auftreten von Mutationen. Das Schwellenkonzept *Zufall* beschreibt hierbei aus mathematischer Perspektive die Unvorhersagbarkeit eines Einzelfalls aus mehreren möglichen Ereignissen (vgl. Schlüsselkonzept Variation; Fiedler & Harms, 2024; Tibell & Harms, 2017).
- Mit Hilfe des Schwellenkonzepts *Wahrscheinlichkeit* kann die Möglichkeit bestimmt werden, mit der ein Ereignis eintreten kann. Hinsichtlich der Variation kann es beispielsweise zur Erklärung von Überlebenswahrscheinlichkeiten von Individuen mit bestimmten Merkmalen genutzt werden (vgl. Schlüsselkonzept individuelle Fitness; Fiedler & Harms, 2024; Tibell & Harms, 2017). Diese hängen wiederum mit dem Reproduktionserfolg des Individuums zusammen, der die Weitergabe des Erbguts ermöglicht (vgl. Schlüsselkonzept Vererbbarkeit; Fiedler & Harms, 2024; Tibell & Harms, 2017) und im Laufe der Zeit (über Generationen oder Milliarden von Jahren) zu Veränderung der Variationsverhältnisse in einer Population (vgl. Schlüsselkonzept Veränderung der Population, Mikroevolution; Opfer et al., 2012) sowie zu Prozessen der Artbildung führen kann (Makroevolution; Göransson et al., 2020).
- Ergänzend bildet das Schwellenkonzept *zeitliche Skala* das Verständnis von sehr kurzen (z. B. das Auftreten einer Mutation) bis sehr langen (der sogenannten Tiefenzeit) Zeiträumen ab, die vor allem dadurch gekennzeichnet sind, dass sie nicht bewusst wahrgenommen werden können und deshalb für Lernende schwer nachvollziehbar sind (Göransson et al., 2020; Graf & Hamdorf, 2012; Tibell & Harms, 2017).
- Das Schwellenkonzept *räumliche Skala* bezieht sich auf die verschiedenen Organisationsebenen, zwischen denen bei der Betrachtung evolutionärer Prozesse gewechselt wird und die für Lernende unterschiedlich greifbar sind. Eine Vorstellung dieser verschiedenen Ebenen ist für das Verständnis von Evolutionsprozessen relevant, da sich Veränderungen von äußerlich sichtbaren Merkmalen eines Individuums (phänotypische Variation; Makroebene) auf Veränderungen in der Erbinformation beispielsweise ausgelöst durch Mutation (genotypische Variation; Submikroebene; vgl. Schlüsselkonzept Variation) zurückführen lassen, die außerhalb des mit dem bloßen Auge sichtbaren Bereichs liegen. Gleichzeitig ist ein Wechsel in die Supermakroebene notwendig, um Veränderungen der Variation in einer Population zu betrachten, die über ein Individuum hinaus reichen (vgl. Schlüsselkonzept Veränderung der Population; Göransson et al., 2020; Tibell & Harms, 2017).

Die fachdidaktische Forschung zeigt jedoch, dass zur Erklärung von evolutionären Veränderungsprozessen häufig auch fachlich inadäquate Vorstellungen beziehungsweise Konzepte (Misconceptions) herangezogen werden, die oftmals auf Alltagsvorstellungen beruhen (Gregory, 2009; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020). Da sich diese Vorstellungen bereits in der Kindheit entwickeln können, sind sie gegenüber der Vermittlung von neuen, fachlich adäquaten Konzepten oft resistent und können mit diesen koexistieren (Bloom & Weisberg, 2007; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020; Opfer et al., 2012). Fachlich inadäquate Konzepte lassen sich ebenfalls kategorisieren:

- Ein wissenschaftshistorisch gewachsenes Beispiel sind *Lamarckistische Vorstellungen* vom Gebrauch beziehungsweise Nicht-Gebrauch von Eigenschaften in der individuellen Lebensspanne eines Organismus, der die Entwicklung (Neu- oder Rückbildung) von Eigenschaften reguliert, die wiederum an die Nachkommen weitergeben werden (Beniermann, 2019; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020).
- *Anthropomorphen Vorstellungen* zufolge ist evolutionäre Veränderung ein selbstgesteuerter Prozess, der aufgrund eines Bewusstseins des Individuums für die eigene unzureichende Entwicklung ausgelöst wird und eine Reaktion auf veränderte Lebensbedingungen darstellt (Beniermann, 2019; Fenner, 2013). Eine solche *Intentionalität* wird durch die Zuschreibung von menschlichen Eigenschaften ermöglicht (Beniermann, 2019; Fenner, 2013).
- Bei *typologischen beziehungsweise essentialistischen Vorstellungen* werden die Individuen einer Art als eine Einheit wahrgenommen, die die gleichen Eigenschaften teilen (Beniermann, 2019). Diese Eigenschaften machen demnach die unveränderliche Essenz einer Art aus, wodurch die Variation innerhalb einer Art vernachlässigt und zwischenartliche Unterschiede überbetont werden (Opfer et al., 2012).
- In *finalistischen beziehungsweise teleologischen Vorstellungen* wird retrospektiv eine zielgerichtete Anpassung, beispielsweise aufgrund der scheinbaren Zweckmäßigkeit von Eigenschaften, konstruiert. Anstelle von zufälligen Prozessen wird hier eine gezielte Lenkung durch eine höhere Instanz oder das Lebewesen selbst angenommen (Beniermann, 2019).

Hinsichtlich der Entwicklungen auf Ebene der Makroevolution äußern sich teleologische Vorstellungen häufig in der Annahme, dass Evolution das Ziel hat immer komplexere Formen hervorzubringen, sodass fälschlicherweise oftmals zwischen höher und niedriger entwickelten Arten unterschieden wird (Gregory, 2008; Kummer et al., 2016; Schramm & Schmiemann, 2019).

Zudem können bei der Analyse makroevolutionärer Entwicklungen fachlich inadäquate Vorstellungen zu zeitlichen Dimensionen von Ereignissen und Prozessen in der Tiefenzeit, wie beispielsweise die zeitliche Einordnung der Entstehung des Menschen, auftreten (Graf & Hamdorf, 2012; Kuschmierz, Beniermann, et al., 2020). Ein fehlendes Verständnis für diese zeitlichen Verhältnisse (vgl. Schwellenkonzept zeitliche Skala) kann die Nachvollziehbarkeit der Dauer evolutionärer Entwicklungen, zum Beispiel von Homologien, einschränken (Catley & Novick, 2009).

Darüber hinaus treten fachlich inadäquate Vorstellungen über makroevolutionäre Prozesse bei der Interpretation phylogenetischer Stammbäume auf. Phylogenetische oder evolutionäre Stammbäume veranschaulichen Verwandtschaftsverhältnisse, indem sie Hypothesen über das Auftreten und Verschwinden von Merkmalen aufstellen und diese in eine zeitliche Rangfolge bringen (Gregory, 2008). Die Verwandtschaftsverhältnisse verschiedener taxonomischer Gruppen (z. B. Arten oder Familien) werden durch, als Äste oder Kanten bezeichnete, Abstammungslinien und deren Verzweigungen (auch Knoten genannt) visualisiert (Gregory, 2008; Schramm, 2022). Ein Knoten repräsentiert hierbei den *jüngsten gemeinsamen Vorfahren* (Most Recent Common Ancestor) einer Klade, das heißt aller nachfolgenden Taxa einschließlich des jüngsten gemeinsamen Vorfahrens (Campbell et al., 2009). Die in einer Klade zusammengefassten Taxa stellen eine monophyletische Gruppe dar, die sich dadurch auszeichnet, dass alle enthalten Taxa (ursprünglich) ein gemeinsam abgeleitetes Merkmal (Synapomorphie; beispielsweise Milchdrüsen bei Säugetieren) tragen und sich dadurch von anderen Kladen abgrenzen lassen (Campbell et al., 2009; Catley & Novick, 2009).

In der biologiedidaktischen Forschung werden phylogenetische Stammbäume häufig in ihrer einfachsten Form, dem Kladogramm, untersucht (Novick & Catley, 2013, 2014). In einem Kladogramm basiert die Darstellung der Verwandtschaftsverhältnisse allein auf dem Verzweigungsmuster, während in anderen Darstellungsweisen (z. B. einem Phylogramm) die Astlänge zusätzliche Information zum Grad der Divergenz, das heißt der evolutionären Auseinanderentwicklung, enthält (Gregory, 2008; Schramm, 2022). Die komplexe und für Lernende oft ungewohnte Darstellungsweise durch phylogenetische Stammbäume kann fachlich inadäquate Vorstellungen beispielsweise zum Alter oder der verwandtschaftlichen Nähe von Arten hervorrufen, wenn die Bedeutung der dargestellten Strukturen nicht adäquat interpretiert wird (Blacquiere & Hoese, 2016; Gregory, 2008; Schramm & Schmiemann, 2019). Ein Beispiel hierfür stellt die Missinterpretation der Knotenanzahl als Maß für verwandtschaftliche Nähe

dar, bei der die Bedeutung der Knoten als Repräsentation des jüngsten gemeinsamen Vorfahrens vernachlässigt wird (Gregory, 2008; Schramm, 2022).

Die Ausprägung des evolutionsbezogenen Wissens wurde in vielfältigen Studien untersucht. Hierbei wurde häufig der lernbiografische Hintergrund wie beispielsweise der Bildungsstand berücksichtigt. Für das schulische Lernen über Evolution ist vor allem das evolutionsbezogene Wissen von Schüler:innen und (angehenden) Biologielehrkräften relevant. Europäische Studien ergaben ein niedriges bis hohes evolutionsbezogenes Wissen bei Schüler:innen (Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020). Studien zu Schüler:innen am Ende der Sekundarstufe I und in der Sekundarstufe II in Deutschland weisen darauf hin, dass diese über geringes (Beniermann, 2019; Kuschmierz, Beniermann, et al., 2020) bis moderates (Lammert, 2012) evolutionsbezogenes Wissen verfügen. Hinsichtlich der Verwendung fachlich inadäquater Konzepte hat sich vor allem eine Neigung zur Nutzung Lamarckistischer und teleologischer Vorstellungen gezeigt (Beniermann, 2019; Kuschmierz, Beniermann, et al., 2020; Lammert, 2012). Sowohl für angehende als auch für erfahrene Biologielehrkräfte zeichnen sich ähnliche Tendenzen ab. Bei diesen Gruppen liegt das evolutionsbezogene Wissen in Europa mehrheitlich im niedrigen bis moderaten Bereich (Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020). Vertiefende Untersuchungen zeigten zudem, dass auch bei (angehenden) Lehrkräften fachlich inadäquate Konzepte weiterhin vorliegen (Beniermann, 2019; Großschedl et al., 2018; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020).

Studienergebnisse zu isomorphen, das heißt gleichartig gestalteten, Items haben ergeben, dass die Fähigkeit evolutionäre Veränderungsprozesse zu erklären je nach Kontext variiert (Federer et al., 2015; Nehm et al., 2012; Nehm & Ha, 2011). Solche *Kontexteffekte* können zur unterschiedlichen Verwendung von Schlüsselkonzepten und fachlich inadäquaten Konzepten führen, obwohl beide Kontexte zur Erklärung die Anwendung derselben Schlüsselkonzepte erfordern (Federer et al., 2015; Großschedl et al., 2018; Kampourakis & Reiss, 2018; Nehm et al., 2012). Ein Vergleich verschiedener Taxa zeigte beispielsweise, dass Studierende zur Erklärung in tierbezogenen Kontexten eher anthropomorphe Vorstellungen (hier Intentionalität) heranzogen, während sie in pflanzenbezogenen Kontexten eher zu teleologischen Vorstellungen neigten (Nehm et al., 2012). Schüler:innen am Ende der Sekundarstufe I und in der Sekundarstufe II in Deutschland tendierten hingegen dazu teleologische Vorstellungen in beiden Kontexten gleichermaßen zu verwenden (Kuschmierz, Beniermann, et al., 2020).

Auch die Richtung (Polarität) eines evolutionären Entwicklungsprozesses hinsichtlich der Neu- oder Rückentwicklung eines Merkmales (oftmals als Erwerb oder Verlust eines Merkmals bezeichnet) ruft eine unterschiedliche Verwendung von Konzepten hervor (Federer et al., 2015;

Nehm & Ha, 2011). Hierbei zeigten Studierende in Beispielen, in denen die Rückentwicklung vorhandener Eigenschaften (Merkmalsverlust) erklärt werden sollte, unabhängig vom Taxon, eine erhöhte Verwendung von fachlich inadäquaten Konzepten bei gleichzeitig reduzierter Verwendung von Schlüsselkonzepten (Nehm & Ha, 2011). Bei angehenden Biologielehrkräften konnten Großschedl et al. (2018) zusätzlich einen signifikanten Interaktionseffekt hinsichtlich der Nutzung von Schlüsselkonzepten feststellen. Dieser wies darauf hin, dass die angehenden Biologielehrkräfte in Kontexten in denen ein Merkmal entwickelt wurde (Merkmalerwerb), in tierbezogenen Kontexten mehr Schlüsselkonzepte verwendeten als in pflanzenbezogenen Kontexten. Hinsichtlich der Rückentwicklung von Merkmalen war hingegen die Verwendung von Schlüsselkonzepten in pflanzenbezogenen Kontexten im Vergleich zu tierbezogenen Kontexten erhöht (Großschedl et al., 2018). Darüber hinaus stellten Federer et al. (2015) fest, dass in Kontexten des Merkmalerwerbs die Schlüsselkonzepte vielfältiger angewendet wurden als in Kontexten des Merkmalsverlusts.

Des Weiteren kann der Grad der Bekanntheit von Taxa (bekannt oder unbekannt) zu unterschiedlicher Verwendung von fachlich adäquaten und inadäquaten Konzepten führen. Im Kontext der natürlichen Selektion zeigte sich für bekannte Taxa sowohl eine erhöhte Verwendung von Schlüsselkonzepten als auch von fachlich inadäquaten Konzepten im Vergleich zu unbekannten Taxa (Federer et al., 2015). Auch beim Lesen und Interpretieren von phylogenetischen Stammbäumen ist der Grad der Bekanntheit relevant. So zogen Studierende in einer Studie von Novick und Catley (2013) für die Interpretation der dargestellten Verwandtschaftsverhältnisse ihnen bekannter Taxa oftmals Informationen aus ihrem Vorwissen heran, die über den dargestellten Inhalt hinausgingen. Widersprachen diese Vorstellungen dem dargestellten Inhalt, konnte dies zu einer fachlich inadäquaten Interpretation der dargestellten Verwandtschaftsverhältnisse führen (Novick & Catley, 2013). Bei der Interpretation von Verwandtschaftsverhältnissen unbekannter Taxa bezogen sich Studierende hingegen vermehrt auf die dargestellten Informationen als bei ihnen bekannten Taxa (Novick & Catley, 2014). Novick und Catley (2014) folgerten aus diesem Vergleich, dass die Studierenden bei unbekannten Taxa vergleichsweise weniger auf ihr Vorwissen und somit auch weniger auf fachlich inadäquate Vorstellungen zurückgriffen.

Aufgrund dieses hohen Abstraktions- und Vernetzungsgrades ist Lernen über Evolution sehr komplex und stellt nicht nur fachliche (z. B. in Form von Schlüsselkonzepten), sondern auch überfachliche (z. B. in Form von Schwellenkonzepten) Anforderungen an Lernende, deren Verständnis zusätzlich von Alltagsvorstellungen (fachlich inadäquate Konzepte) beeinflusst sein

kann (z. B. Göransson et al., 2020; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020; Opfer et al., 2012). Darüber hinaus werden im fachdidaktischen Diskurs neben kognitiven Voraussetzungen oftmals auch affektive (z. B. die Akzeptanz der Evolution) und weitere personenbezogene Variablen wie die Religiosität oder der Bildungsstand als relevante Lernendenmerkmale im Kontext der Evolution betrachtet (Deniz et al., 2008; Park, 2007). Im Folgenden wird daher zunächst die Bedeutung evolutionsbezogener Einstellungen für das evolutionsbezogene Wissen dargestellt und anschließend der Bezug zu weiteren personenbezogenen Variablen hergestellt.

2.2 Die Bedeutung evolutionsbezogener Einstellungen für das evolutionsbezogene Wissen

Einstellungen sind wertende Urteile gegenüber einem konkreten oder abstrakten Einstellungsobjekt (Haddock & Maio, 2023). Gemäß dem Multikomponentenmodell der Einstellungen bilden sich diese in ihrer Gesamtheit aus kognitiven, affektiven und verhaltensbezogenen Komponenten, deren Ausprägung je nach Einstellungsobjekt unterschiedlich stark ausfallen kann. Die *kognitive Komponente* setzt sich aus Überzeugungen und Gedanken bezüglich des Einstellungsobjektes zusammen. Während die *affektive Komponente* durch Gefühle und Emotionen zu dem Einstellungsobjekt gekennzeichnet ist, die sich häufig nach einer Auseinandersetzung mit diesem entwickeln. Die *verhaltensbezogene Komponente* berücksichtigt schließlich bereits gezeigtes oder künftig mögliches Verhalten einer Person in Bezug auf das Einstellungsobjekt (Haddock & Maio, 2023; Konnemann et al., 2012). Einstellungen können für eine Person vielfältige Funktionen wie den Ausdruck von Werten übernehmen (Haddock & Maio, 2023). Stehen beispielsweise die kognitive und verhaltensbezogene Komponente einer Einstellung im Widerspruch zu einander, kann dies eine kognitive Dissonanz bei einer Person auslösen, die unter anderem durch eine Anpassung der Einstellung aufgelöst oder durch Vermeidung umgangen werden kann (Haddock & Maio, 2023). Bei starken Einstellungen hat sich jedoch gezeigt, dass diese sich nicht so leicht ändern lassen und dazu tendieren neben dem Verhalten auch die Informationsverarbeitung zu beeinflussen (Haddock & Maio, 2023; Krosnick & Petty, 1995). Der Zusammenhang zwischen den themenbezogenen Einstellungen und dem dazugehörigen Wissen ist daher ein häufiges Untersuchungsziel in der Unterrichtsforschung.

In der evolutionsbezogenen Einstellungsforschung wird meist die Akzeptanz der Evolution in den Blick genommen. Die *Valenz* einer Einstellung beschreibt ihre Richtung, die wiederum unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann (Haddock & Maio, 2023). Die Akzeptanz der Evolution kann demnach als positive Einstellung gegenüber der Evolution definiert werden, deren gegensätzliche, also negative, Ausprägung die Ablehnung der Evolution ist (Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020). Es wird angenommen, dass die Akzeptanz der Evolution in

Zusammenhang mit dem vorhandenen Wissen einer Person steht und bei höherem Wissen entsprechend höher ausgeprägt ist (Sinatra et al., 2003). Studien mit Lernenden am Ende der Sekundarstufe I und in der Sekundarstufe II in Deutschland zeigen, dass die Akzeptanz der Evolution in diesen Gruppen eher moderat bis hoch ausgeprägt ist (Benierrmann, 2019; Konnemann et al., 2016; Lammert, 2012) und dazu tendiert in einem schwach positiven Zusammenhang mit dem evolutionsbezogenen Wissen zu stehen (Benierrmann, 2019). Für (angehende) Biologielehrkräfte in Deutschland wurden ebenfalls eher hohe Akzeptanzwerte identifiziert (Benierrmann, 2019; Großschedl et al., 2014; Großschedl et al., 2018). Benierrmann (2019) konnte hierbei feststellen, dass sich Schüler:innen verschiedener Jahrgangstufen (Klasse 7 und Klasse 9 bis 11) in ihrer Akzeptanz der Evolution untereinander zwar nicht unterschieden, jedoch signifikant geringere Akzeptanzwerte aufwiesen als angehende Biologielehrkräfte oder Studierende. Auch zeigten sich sowohl bei Schüler:innen am Ende der Sekundarstufe I (Lammert, 2012) als auch bei angehenden Biologielehrkräften (Großschedl et al., 2014) signifikante Unterschiede in der Akzeptanz der Evolution hinsichtlich des Geschlechts, bei denen männliche Proband:innen zwar eine höhere Akzeptanz zeigten, der Effekt jedoch nur sehr schwach ausgeprägt war.

Hinsichtlich der Akzeptanz der Evolution gibt es ebenfalls Hinweise auf Kontexteffekte. So fällt unter anderem die Akzeptanz bei der allgemeinen Betrachtung der Evolution oftmals höher aus als bei der speziellen Betrachtung der Evolution des Menschen (Humanevolution), obwohl beiden Kontexten dieselben biologischen Prinzipien zugrunde liegen (Nehm & Ha, 2011). Nadelson und Southerland (2012) schlagen daher vor die Akzeptanz der Mikro-, Makro- und Humanevolution getrennt voneinander zu betrachten. Bei dieser Unterscheidung zeigt sich, dass Personen hinsichtlich der Mikroevolution meist vergleichsweise höhere Akzeptanzwerte aufweisen als in Bezug auf Makro- oder Humanevolution (Barnes et al., 2019). Neben fehlendem evolutionsbezogenem Wissen können (wahrgenommene) Konflikte mit den religiösen Vorstellungen einer Person eine weitere mögliche Ursache für eingeschränkte Akzeptanz darstellen (siehe Kapitel 2.3, Barnes, Dunlop, et al., 2020).

2.3 Die Vereinbarkeit von religiösen Vorstellungen und evolutionsbezogenem Wissen

Die Religiosität einer Person kann ebenfalls als mehrdimensionales Konstrukt angesehen werden, das unter anderem kognitive, affektive sowie verhaltensbezogene Komponenten beinhaltet (Klie & Kühn, 2022). Nach Huber (2008) variiert die Bedeutung der Religiosität für die eigene Persönlichkeit je nach Ausprägung. So beschreibt er, dass religiöse Konstruktsysteme bei hochreligiösen Personen einen zentralen Aspekt der Persönlichkeit darstellen, von dem aus auch

nicht-religionsbezogene Inhalte betrachtet werden. Bei weniger stark religiösen Personen fällt laut Huber (2008) die Bedeutung für die eigene Persönlichkeit geringer aus, wodurch nicht-religionsbezogene Inhalte eher getrennt von religiösen Konstruktsystemen betrachtet werden. Für nicht religiöse Personen nimmt er hingegen an, dass sie sich selten bis nie auf religiöse Konstruktsysteme beziehen.

Vor diesem Hintergrund wird die Evolutionstheorie häufig als kontroverses Thema wahrgenommen, wenn sie als widersprüchlich zu religiösen Vorstellungen empfunden wird (Barnes, Dunlop, et al., 2020). Dies liegt vor allem darin begründet, dass sowohl religiöse als auch nicht-religiöse Personen die Evolutionstheorie oftmals mit einer atheistischen Sichtweise verbinden (Barnes, Dunlop, et al., 2020; Hameed, 2008). Diese Wahrnehmung kann dazu führen, dass die Evolutionstheorie insbesondere von stark religiösen Personen eher abgelehnt wird (Betti et al., 2020; Unsworth & Voas, 2018). Verspüren religiöse Lernende im Evolutionsunterricht einen Konflikt zwischen ihren religiösen Überzeugungen und den wissenschaftlichen Erkenntnissen über die Evolution können sie sich in der Folge unwohl beim Lernen evolutionsbezogener Inhalte fühlen (Barnes, Dunlop, et al., 2020; Barnes et al., 2021). Didaktische Ansätze zur Thematisierung möglicher Konflikte im Evolutionsunterricht werden in Kapitel 2.4 vorgestellt.

Weitere Ergebnisse internationaler Forschung zeigen, dass die Religiosität einer Person in einem negativen Zusammenhang mit dem evolutionsbezogenen Wissen und der Akzeptanz der Evolution steht (z. B. Betti et al., 2020; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020). Diese Zusammenhänge konnten teilweise auch bei deutschen Schüler:innen am Ende der Sekundarstufe I festgestellt werden (Lammert, 2012). Die Forschungsergebnisse weisen jedoch darauf hin, dass die Religiosität einen stärkeren Einfluss auf die Akzeptanz der Evolution als auf das evolutionsbezogene Wissen hat (Barnes et al., 2017) und nicht-religiöse Personen sowie Personen mit geringer Religiosität eine höhere Akzeptanz der Evolution zeigen (Betti et al., 2020; Lammert, 2012; Unsworth & Voas, 2018).

Gleichzeitig gibt es Hinweise darauf, dass die Religiosität nicht als alleiniger Prädiktor für die Akzeptanz der Evolution gesehen werden kann, da auch religiöse Personen akzeptierende Haltungen zur Evolution zeigen (z. B. Beniermann, 2019; Ecklund & Scheitle, 2014; Everhart & Hameed, 2013). Hierbei haben sich der wahrgenommene Konflikt zwischen den wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Evolution und religiösen Vorstellungen (Barnes et al., 2021), aber auch Vorstellungen und Einstellungen zur (Natur der) Wissenschaft (Großschedl et al., 2014; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020; Smith, 2010) als weitere Prädiktoren für die Akzeptanz der Evolution herausgestellt.

Bei der Frage nach religionsbezogenen Variablen, die das evolutionsbezogene Wissen und die Akzeptanz der Evolution potenziell beeinflussen können, wird in der Forschung zur weiteren Differenzierung vermehrt ein Augenmerk auf die Rolle der konfessionellen Zugehörigkeit gelegt. Hierbei haben sich insbesondere Zusammenhänge zwischen der Konfession² und der Akzeptanz der Evolution gezeigt (Barone et al., 2014). Im Vergleich wiesen Personen bestimmter christlicher (z. B. Freikirchler; Beniermann, 2019; Konnemann et al., 2016) und muslimischer Glaubensrichtungen (Betti et al., 2020; Unsworth & Voas, 2018) die niedrigsten Akzeptanzwerte auf, während konfessionslose oder atheistische Personen die höchsten Akzeptanzwerte zeigten. Diese Tendenzen sind jedoch nicht auf alle Länder gleichermaßen übertragbar, da sich religiöse Glaubensgemeinschaften hinsichtlich der Auslegung religiöser Schriften sowie der Bedeutung religiöser Regeln und Praktiken regional unterscheiden (Clément, 2015; Schneider, 2020). Auch bei Schüler:innen zu Beginn (Fenner, 2013) und am Ende der Sekundarstufe I (Lammert, 2012) wiesen Schüler:innen einer muslimische Glaubensrichtung sowie weiterer nicht-christlicher Glaubensrichtungen die geringsten Akzeptanzwerte auf. Bei der Interpretation konfessionsbezogener Ergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Generalisierbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich einzelner Gruppen (z. B. der muslimischen Glaubensrichtungen) eingeschränkt sein kann, da diese in Studien oftmals eine geringe Stichprobengröße aufweisen (Kuszmierz, Meneganzin, et al., 2020).

2.4 Die Vermittlung evolutionsbezogenen Wissens

Lernen über Evolution stellt sich nicht nur aus Lernendenperspektive als komplex dar. Auch die Vermittlung von evolutionsbezogenen Inhalten aus Lehrendenperspektive ist häufig mit Schwierigkeiten verbunden. So können das eigene evolutionsbezogene Wissen und Vorbehalte über dessen Vermittlung beeinflussen, in welchem Ausmaß Lehrkräfte Evolution unterrichten (Smith, 2010). Bereits bei angehenden Biologielehrkräften wirken sich Überzeugungen über die eigenen Fähigkeiten und Ressourcen (wahrgenommene Verhaltenskontrolle) auf die Intention künftig Evolution zu unterrichten aus (Aptyka & Großschedl, 2022). Zu solchen Vorbehalten auf Lehrendenseite gehören unter anderem mangelndes evolutionsbezogenes fachwissenschaftliches sowie fachdidaktisches Wissen, aber auch die Sorge vor potenziellen Konflikten mit Lernenden oder anderen Beteiligten (Asghar et al., 2007).

Studien mit Fokus auf kultursensiblen Evolutionsunterricht heben hervor, dass Lehrkräfte für einen möglichen Konflikt bei Lernenden sensibilisiert und über Lehr- und Lernansätze zur

² Im Folgenden wird ein weiter Konfessionsbegriff verwendet, der sich nicht nur auf christliche Konfessionen (z. B. katholisch), sondern auch auf andere (z. B. muslimische) Glaubensrichtungen bezieht.

kultursensiblen Anleitung von Lernenden aufgeklärt werden sollten (Anderson, 2007; Dunk et al., 2019; Truong et al., 2018). Hierzu identifizieren Truong et al. (2018) in qualitativen Analysen verschiedene förderliche Vorgehensweisen von Lehrkräften: Neben der Vermittlung von evolutionsbezogenem Wissen sollten Lehrkräfte unter anderem eine sichere Lernumgebung schaffen, in der ein möglicher Konflikt der Lernenden Anerkennung finden kann. Zudem gibt es Hinweise darauf, dass eine Wahrnehmung der Evolutionstheorie als agnostisch, die Akzeptanz bei religiösen Personen erhöhen kann, da diese Sicht einen potenziellen Einfluss durch eine höhere Instanz (z. B. Gott) nicht ausschließt (Barnes, Dunlop, et al., 2020). In diesem Zusammenhang wird nach Truong et al. (2018) das Vorstellen von Vorbildern aus der Wissenschaft, die eine Vereinbarung ihrer religiösen Vorstellungen mit der Evolutionstheorie erreicht haben, von Lernenden als positiv aufgefasst. Eine Möglichkeit zur Vereinbarung dieser beiden Inhalte zeigt beispielsweise der Ansatz der *Nonoverlapping Magisteria* des Evolutionsbiologen Stephen Jay Gould (1997). Er schlägt vor Wissenschaft und Religion als zwei separate Bereiche beziehungsweise Magisterien zu betrachten, die gemeinsam dazu beitragen können Fragen der Menschheit zu lösen. Die Wissenschaft, zu der die Erkenntnisse bezüglich der Evolution zählen, befasst sich demnach mit der Empirie, während die Religion moralische Fragen untersucht (Gould, 1997). Für eine Vereinbarung von Wissenschaft und Religion ist nach diesem Ansatz eine individuelle Auseinandersetzung mit beiden Magisterien erforderlich (Gould, 1999; Helama, 2024). Neuere Ansätze aus der biologiedidaktischen Forschung schlagen ergänzend vor, das Verständnis über die Natur der Wissenschaft und ihre Grenzen im Sinne der *Bounded Nature of Science* zu fördern (Barnes, Dunlop, et al., 2020; Nelson et al., 2019; Southerland & Scharmann, 2013). Diese besagt unter anderem, dass die Wissenschaft natürliche Phänomene erklären, jedoch über metaphysische Phänomene keine Aussagen treffen kann (Barnes, Dunlop, et al., 2020; Southerland & Scharmann, 2013). Bei der Einordnung solcher Empfehlungen sollte jedoch beachtet werden, dass die Funktion des Biologieunterrichts nicht darin besteht, Lernenden ihren persönlichen religiösen Glauben abzusprechen oder ihnen das Gefühl zu vermitteln, diesen ablegen zu müssen (Ohly, 2012; Smith, 2010).

Studien zur Förderung des evolutionsbezogenen Wissens orientieren sich sowohl an allgemeinen als auch an biologie- beziehungsweise evolutionsspezifischen Lehransätzen (Smith, 2010). Hierbei finden insbesondere Lehrkonzepte basierend auf dem *Conceptual Change* Anwendung, bei dem vorherrschende Konzepte der Lernenden explizit angesprochen und aus fachlicher Sicht aufgearbeitet werden (Aleknavičiūtė et al., 2023; Smith, 2010). Die fachdidaktische Forschung fokussiert sich hierbei mehrheitlich auf das Lernen über Mikroevolution, beispielsweise hinsichtlich der natürlichen Selektion, weshalb oft eine Erweiterung des Forschungsfeldes

hinsichtlich der Makroevolution gefordert wird (Aleksavičiūtė et al., 2023; Catley, 2006; Nadelson & Southerland, 2009). So zeigten Novick und Catley (2014), dass bereits eine gezielte Einführung über phylogenetische Stammbäume mittels eines kurzen Lehrheftes positive Effekte auf den Lernerfolg hinsichtlich der Stammbaumlesefähigkeit hatte.

Andere Studien wie die von Neubrand et al. (2016) und Neubrand und Harms (2017) untersuchen den Einsatz von Instruktionsstrategien zur angepassten Förderung von wissensheterogenen Lernenden im Kontext der Evolution. Instruktionsstrategien dienen dazu Lernende während des Lernprozesses beispielsweise durch Hinweise, dem sogenannten Prompting, zu unterstützen. Ein Prompt gibt Lernenden einen für den Lernprozess relevanten Impuls. Dieser kann sich sowohl auf kognitive (z. B. Elaboration) als auch metakognitive (z. B. Monitoring) Prozesse beziehen und somit selbstgesteuertes Lernen fördern (Hübner et al., 2006). Eine weitere Möglichkeit zur Anleitung des Lernprozesses bietet die Bereitstellung von ausgearbeiteten Lösungsbeispielen. In ausgearbeiteten Lösungsbeispielen werden die Lernenden schrittweise durch den bereits aufbereiteten Lösungsprozess geleitet (Reiss & Renkl, 2002). Ziel ist es, den Fokus der Lernenden auf den Lösungsprozess und die dabei angewandten Prinzipien zu lenken und sie dadurch zur selbstständigen Anwendung in anderen Kontexten zu befähigen (Kirschner et al., 2006; Neubrand et al., 2016).

In den Studien von Neubrand et al. (2016) und Neubrand und Harms (2017) wurden Lernende schrittweise mittels ausgearbeiteter Lösungsbeispiele durch ein zweigeteiltes Lernmaterial geführt, das sowohl mikro- (Thema: Selektion) als auch makroevolutionäre (Thema: Homologien, auch unter Einbezug von phylogenetischen Stammbäumen) Lerninhalte vermittelte. Verbindlich zu nutzende Prompts waren direkt in das Lernmaterial integriert und leiteten die Lernenden zu Prozessen der Selbsterklärung in Bezug auf die bereitgestellten Lösungsansätze an. Lernende mit geringem Wissen erhielten an ihren Lernstand angepasste Prompts, die sie zu materialbasierten Selbsterklärungen anregten, wie beispielsweise das Paraphrasieren. Lernende mit hohem Wissen erhielten ebenfalls an ihre Bedürfnisse angepasste Prompts, die sie dazu aufforderten basierend auf ihrem Vorwissen weiterzudenken und selbstständig Schlussfolgerungen zu ziehen. Lernende mit durchschnittlichem Wissen hingegen erhielten keine angepassten Prompts. Sie wurden in drei Gruppen unterteilt und erhielten entweder Prompts für Lernende mit geringem oder hohem Wissen oder kombinierte Prompts, bei denen die Prompts für Lernende mit geringem Wissen mit zunehmender Bearbeitung eines Lösungsbeispiels durch Prompts für Lernende mit hohem Wissen ersetzt wurden. Die Studie von Neubrand et al. (2016) liefert Hinweise darauf, dass zwar alle Lernenden einen Lernzuwachs hatten, dieser bei den

Lernenden mit geringem Wissen jedoch am höchsten und bei den Lernenden mit hohem Wissen am niedrigsten ausgeprägt war. Ein Ziel beider Studien war zu untersuchen, mit welcher Promptingmaßnahme Lernende mit durchschnittlichem Wissen am besten lernten. Während Neubrand et al. (2016) keinen Unterschied im Lernerfolg der durchschnittlichen Lernenden zwischen den drei Promptingmaßnahmen feststellten, zeigten sich bei der Qualität der Selbsterklärungen in der Studie von Neubrand und Harms (2017) Unterschiede. Lernende, die mit kombinierten Prompts gelernt hatten, formulierten weniger falsche Erklärungen als Lernende, die unter anderen Promptingmaßnahmen gelernt hatten (Neubrand & Harms, 2017).

2.5 Die Wirksamkeit von Instruktionsstrategien in heterogenen Lerngruppen

Die Ergebnisse von Neubrand et al. (2016) und Neubrand und Harms (2017) ergänzen Studienergebnisse zu durch Instruktionsstrategien unterstützte Lernarrangements ohne direkten Evolutionsbezug. Diese weisen darauf hin, dass durch Instruktionsstrategien gestützte Lernarrangements insbesondere bei Lernenden mit geringem Wissen zu besseren Lernerfolgen führen als offenere Formate ohne oder mit nur geringer Unterstützung (Kirschner et al., 2006; Mayer, 2004). Ein größerer Nutzen von Instruktionsstrategien wie dem Prompting oder dem Einsatz ausgearbeiteter Lösungsbeispiele für Lernende mit geringerem Wissen lässt sich auf den sogenannten *Expertise-Umkehr-Effekt* (Expertise Reversal Effect) zurückführen (Kalyuga, Chandler, & Sweller, 2001; Kalyuga, Chandler, Tuovinen, et al., 2001; Roelle & Berthold, 2013). Dieser beschreibt das Phänomen, dass Lernende mit höher ausgeprägtem Wissen durch Unterstützungsmaßnahmen am Lernen gehindert werden können, während diese bei Lernenden mit geringem Wissen den Lernprozess unterstützen. Diese gegenteilige Wirkung kann durch unterschiedliche kognitive Belastungen während des Lernprozesses ausgelöst werden (Kalyuga et al., 2003; Roelle & Berthold, 2013). Die *Theorie der kognitiven Belastung* (Cognitive Load Theory) beschreibt die Bedeutung des Arbeitsgedächtnisses und seinen Kapazitäten für den langfristigen Wissenserwerb (Paas et al., 2010; Sweller, 2010). Kognitive Belastungen können in der Komplexität des Lerninhalts selbst (*intrinsische kognitive Belastung*), aber auch in der Aufbereitung des Materials (*extrinsische kognitive Belastung*) begründet sein und sind für den Lernprozess hinderlich. Die *lernbezogene kognitive Belastung* wird ebenfalls durch die Gestaltung der Instruktion beeinflusst. Anders als die zuvor genannten Belastungstypen ist sie für den Lernprozess förderlich, da sie kognitive Ressourcen verfügbar macht (Paas et al., 2003; Sweller, 2010). Instruktionsstrategien bieten eine Möglichkeit positiv auf die kognitive Belastung einzuwirken, indem sie die Komplexität des Lernmaterials reduzieren und Hinweise für den Lösungsprozess liefern. Hierzu gehören beispielsweise die schrittweise

Komplexitätszunahme innerhalb einer Lerneinheit zur Reduktion der intrinsischen kognitiven Belastung sowie die Bereitstellung von ausgearbeiteten Lösungsbeispielen zur Reduktion der extrinsischen kognitiven Belastung (Kalyuga, Chandler, & Sweller, 2001; Kirschner et al., 2006; Neubrand et al., 2016; Paas et al., 2003). Idealerweise werden beide Vorgehensweisen ergänzend eingesetzt, um dadurch Kapazitäten im Arbeitsgedächtnis sowie die lernbezogene kognitive Belastung zu erhöhen (Paas et al., 2003; Paas et al., 2010).

Lernende mit geringem Wissen erfahren durch die Anleitung mittels Instruktionsstrategien eine geringere extrinsische kognitive Belastung bei einer gleichzeitigen Erhöhung der lernbezogenen kognitiven Belastung (Kalyuga, 2007; Paas et al., 2003). Bei Lernenden mit hohem Wissen können Instruktionsstrategien jedoch zu Redundanzen mit bereits vorhandenem Wissen führen, die mit den eigenen Denkstrukturen abgeglichen werden müssen (Kalyuga et al., 2003; Roelle & Berthold, 2013). Diese Abgleichprozesse erhöhen die extrinsische kognitive Belastung der Lernenden und blockieren Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses, sodass diese für den Lernprozess nicht mehr zur Verfügung stehen (Kalyuga, 2007; Kalyuga et al., 2003). Solche Effekte beziehen sich nicht nur auf das Vorwissen, sondern können mit zunehmendem Wissensaufbau der Lernenden auch innerhalb einer Lerneinheit auftreten (Kalyuga, 2007; Kirschner et al., 2006). In der Konsequenz impliziert der Expertise-Umkehr-Effekt, dass Unterstützungsmaßnahmen durch Instruktionsstrategien adaptiv an den jeweiligen Lernstand der Lernenden angepasst werden sollten (Kalyuga et al., 2003; Kalyuga & Sweller, 2004).

Eine Möglichkeit, Lernende mit den gleichen Instruktionsmaßnahmen zu unterstützen und gleichzeitig das Ausmaß der Unterstützung an den jeweiligen Lernstand der Lernenden anzupassen, bieten gestufte Lernhilfen. Sie bestehen aus mehreren Hilfestellungen, die jeweils auf einer Kombination aus Prompting und ausgearbeiteten Lösungsbeispielen basieren (Hänze et al., 2010; Schmidt-Weigand et al., 2008). Durch ihre mehrstufige Struktur ermöglichen sie eine Differenzierung auf mehreren Ebenen:

- *Differenzierung innerhalb einer Stufe:* Jede Stufe einer gestuften Lernhilfe besteht aus einer zweiteiligen Hilfestellung. Der erste Teil innerhalb einer Stufe (z. B. die Vorderseite einer Hilfekarte) bietet den Lernenden einen Prompt an. Dieser gibt einen Impuls und regt dadurch die Lernenden zum Nachdenken an. Der zweite Teil innerhalb der Stufe (z. B. die Rückseite der Hilfekarte) präsentiert die dazugehörige Antwort in Form eines ausgearbeiteten Lösungsbeispiels (Hänze et al., 2010; Hänze et al., 2007).
- *Differenzierung zwischen verschiedenen Stufen:* Gestufte Lernhilfen bestehen aus mehreren Stufen. Die Hilfestellungen werden mit zunehmender Stufe (z. B. repräsentiert

durch weitere Hilfekarten) spezifischer. In der Regel stellt die erste Stufe einen Hinweis zum Verständnis der Aufgabenstellung dar und setzt erste Impulse zur Lösungsfindung. Die letzte Stufe wird oftmals als Lösungsstufe bezeichnet und bildet eine Musterlösung ab (Hänze et al., 2010; Schmidt-Weigand et al., 2009).

- *Bedarfsorientierte, optionale Nutzung*: Gestufte Lernhilfen sehen vor, dass sie von Lernenden nur bei Bedarf und nur bis zur benötigten Stufe genutzt werden. Dies ermöglicht es Lernenden den Grad der Unterstützung an den eigenen Lernstand anzupassen (Arnold et al., 2017; Hänze et al., 2007).

Die bisherige biologiedidaktische Forschung hat die Wirksamkeit von gestuften Lernhilfen meist für das Lernen beim Experimentieren untersucht und dabei insbesondere den Lernerfolg und die intrinsische Motivation fokussiert (z. B. Großmann & Wilde, 2019; Schmidt-Borcherding et al., 2013; Stiller & Wilde, 2023). Die Ergebnisse dieser Studien sind in beiden Bereichen heterogen. Hinsichtlich des Lernerfolgs gibt es Hinweise darauf, dass gestufte Lernhilfen gleich wirksam zu anderen Methoden wie ausgearbeitete Lösungsbeispiele (Großmann & Wilde, 2019) oder letzteren potenziell unterlegen sind (Schmidt-Borcherding et al., 2013). Auch haben sich förderliche Effekte von gestuften Lernhilfen für Lernende mit geringerem Wissen gezeigt (Großmann & Wilde, 2019). Untersuchungen zur Wirkung von gestuften Lernhilfen auf die intrinsische Motivation zeigen ebenfalls gemischte Ergebnisse, die sowohl vergleichsweise positivere Effekte für die gestuften Lernhilfen (Schmidt-Borcherding et al., 2013) als auch für stärker strukturierte Lernarrangements (Stiller & Wilde, 2023) feststellen. Intrinsische Motivation begründet ein Verhalten, dass durch die Freude an der Aktivität selbst und nicht durch äußere Faktoren wie Lob oder Bestrafung ausgelöst wird (Ryan & Deci, 2020). Sie ist außerdem eng mit der Befriedigung der sogenannten *psychologischen Grundbedürfnisse* (Basic Psychological Needs) verknüpft zu denen das Bedürfnis nach Kompetenz und Autonomie gehören. Das Bedürfnis nach Kompetenz wird durch das Gefühl Aufgaben lösen zu können befriedigt, während das Bedürfnis nach Autonomie ein selbstbestimmtes Handeln (beispielsweise durch Wahlfreiheit) einschließt (Ryan & Deci, 2020). Die Struktur gestufter Lernhilfen ist geeignet diese beiden Bereiche in besonderer Weise zu fördern, weil sie zum einen eine schrittweise Hilfestellung anbieten, die selbstständiges Lernen beziehungsweise bearbeiten der Aufgabe ermöglicht und zum anderen aufgrund der optionalen Nutzung Lernenden eine Wahlfreiheit gibt (Hänze et al., 2010). In der bisherigen Forschung wurden solche positiven Effekte bisher nur hinsichtlich der Kompetenzwahrnehmung (Schmidt-Weigand et al., 2009) nicht jedoch der Autonomiewahrnehmung (Schmidt-Borcherding et al., 2013; Schmidt-Weigand et al., 2009) gefunden.

Gestufte Lernhilfen haben zum Ziel, Lernende zur selbstständigen Lösung einer komplexen Aufgabe heranzuführen, indem sie bei Bedarf genutzt werden. In diesem Zusammenhang bislang unberücksichtigt ist ihre Wirkung auf die Selbstwirksamkeitserwartungen von Lernenden. Selbstwirksamkeitserwartungen beschreiben den eigenen Glauben daran, eine Aufgabe oder Situation bewältigen zu können, unabhängig davon, ob diese Einschätzung sich in künftigen Situationen bewahrheitet (Bandura, 1978). Untersuchungen zu ausgearbeiteten Lösungsbeispielen (Glogger-Frey et al., 2015) und Promptingmaßnahmen (Gentner & Seufert, 2020) konnten bereits positive Effekte auf die Selbstwirksamkeitserwartungen von Lernenden feststellen. Die Nutzung von gestuften Lernhilfen und der damit verbundene Lernfortschritt könnten sich daher förderlich auf die Entwicklung von Selbstwirksamkeitserwartungen der Lernenden auswirken.

3 Fragestellung

Die bisherige fachdidaktische Forschungslage verdeutlicht, dass das Lernen über Evolution vielfältige Anforderungen an Lernende stellt. Hierbei spielen sowohl kognitive als auch affektiv-motivationale Faktoren eine Rolle. Aufgrund des positiven Zusammenhangs zwischen dem evolutionsbezogenen Wissen und der Akzeptanz der Evolution wird angenommen, dass eine hohe Akzeptanz sich lernförderlich auf den Wissenserwerb auswirken kann (siehe Kapitel 2.2). Die Akzeptanz der Evolution kann durch vielfältige Faktoren, wie einem mangelnden Verständnis über die sogenannte *Nature of Science* oder aufgrund von wahrgenommenen Konflikten mit religiösen Vorstellungen beeinflusst sein (Barnes, Dunlop, et al., 2020; Barnes et al., 2021; Nelson et al., 2019).

In diesem Zusammenhang hat sich die Religiosität einer Person als potenziell relevant für das Lernen über Evolution herausgestellt (siehe Kapitel 2.3). Die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus verschiedenen Regionen ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da sich die Anteile der konfessionellen Zugehörigkeit sowie die Auslegung religiöser Vorstellungen regional unterscheiden können (z. B. Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020; Schneider, 2020). Für Deutschland zeigen Zahlen aus dem Jahr 2022 einen Anteil an konfessionslosen Personen von 43%, während ca. 52% einer christlichen Gemeinschaft und 5% einer nicht-christlichen Religion wie beispielsweise dem Islam angehörten (Evangelische Kirche in Deutschland, 2023). Von Personen, die einer christlichen oder muslimischen Konfession angehörten, gaben 82% der Personen mit Migrationshintergrund (aus muslimisch geprägten Herkunftsländern) und 55% der christlichen Personen ohne Migrationshintergrund an, eher bis stark gläubig zu sein (Bundesamt für Migration und Flüchtlinge, 2020). Gleichzeitig identifizierte sich 56% der deutschen Bevölkerung als säkular, von der die Mehrheit (36%) einem naturalistisch-szientistischen Weltbild folgte (Evangelische Kirche in Deutschland, 2023). Vor dem Hintergrund dieser vielfältigen Ausgangslage ist ein tieferes Verständnis über die Bedeutung der Religiosität sowie der konfessionellen Zugehörigkeit einer Person für das Lernen über Evolution in Deutschland wichtig, um dieses künftig besser an die Bedürfnisse der Lernenden anzupassen und die Thematik allen Lernenden zugänglich zu machen.

Darüber hinaus können auf der motivationalen Ebene weitere Lernendenmerkmale wie Selbstwirksamkeitserwartungen und intrinsische Motivation auf den Lernprozess wirken und unter anderem das Hilfesuchverhalten beeinflussen (siehe Kapitel 5.2.1). Da diese individuellen Lernendenmerkmale für den Wissensaufbau sowie für die Annahme von Fördermaßnahmen bedeutsam sein können, beschäftigt sich diese Arbeit mit der übergreifenden Frage:

(1) Welche ausgewählten personenbezogenen Variablen (Wissen, Einstellungen, religionsbezogene und motivationale Variablen) sind für das Lernen über Evolution relevant?

Aufgrund der vielfältigen evolutionsbezogenen Wissensbereiche (z. B. zu mikro- und makro-evolutionären Prozessen) ist evolutionsbezogenes Lernen in verschiedenen Kontexten zu unterscheiden (siehe Kapitel 2.1). Im Bereich der Mikroevolution wird vor allem das Wissen über natürliche Selektion untersucht, dessen Förderung meist durch Conceptual-Change-Ansätze angestrebt wird, in denen Lernende über fachlich (in-)adäquate Konzepte aufgeklärt werden (siehe Kapitel 2.4; Aptyka et al., 2022; Heddy & Sinatra, 2013). Für das Lernen über makro-evolutionäre Prozesse hingegen ist zum einen ein Verständnis über zeitliche Dimensionen (vgl. Schwellenkonzept zeitliche Skala) von großer Bedeutung (Catley & Novick, 2009; Erwin, 2000). Zum anderen erfordert es Kompetenzen im Bereich der Lesefähigkeit diskontinuierlicher Texte, die für das Lesen und Interpretieren evolutionärer Stammbäume benötigt werden (Kummer et al., 2016). Diese thematische Vielfalt stellt nicht nur Lernende sondern auch Lehrende vor vielfältige Herausforderungen, da Lernangebote im Kontext der Evolution unterschiedliche Anforderungen erfüllen müssen. Eine Aufgabe, die mit erheblichem zeitlichem und didaktischem Aufwand verbunden sein kann.

Studien im Kontext der Evolution weisen darauf hin, dass Instruktionsstrategien wie das Prompting Lernende bei der Erschließung komplexer evolutionsbezogener Inhalte unterstützen können (siehe Kapitel 2.4). Allerdings zeichnen sich Unterschiede in der Wirksamkeit zwischen Lernenden mit unterschiedlichen Lernvoraussetzungen hinsichtlich des vorhandenen Wissens ab, die potenziell mit einem Expertise-Umkehr-Effekt verbunden sind (siehe Kapitel 2.5, Neubrand et al., 2016). Dies gibt Hinweise darauf, dass Instruktionsstrategien auch beim Lernen über Evolution idealerweise an verschiedene Wissensstände angepasst sein sollten (Neubrand et al., 2016; Neubrand & Harms, 2017). Gestufte Lernhilfen werden Lernenden optional zur Verfügung gestellt und können von ihnen bei Bedarf genutzt werden. Sie kombinieren Prompts mit Lösungsbeispielen und reduzieren die Komplexität einer Aufgabe schrittweise (Hänze et al., 2010; Schmidt-Weigand et al., 2008). Da Lernende hier selbst über den Grad der Nutzung entscheiden, verspricht dieser Ansatz mögliche Über- oder Unterforderungseffekte zu reduzieren (Arnold et al., 2017; Franke-Braun et al., 2008). Ein Vergleich mit weiteren Instruktionsstrategien wie dem Prompting oder dem Einsatz von Lösungsbeispielen und deren optionaler Gebrauch im Kontext der Evolution steht jedoch noch aus (siehe Kapitel 5.2.1). Diese Arbeit befasst sich daher vertiefend mit der Frage:

Fragestellung

(2) Lässt sich das Lernen über Evolution durch ausgewählte Instruktionsstrategien (gestufte Lernhilfen, gestufte Prompts, gestufte Lösungsbeispiele) wirksam unterstützen?

4 Projektübersicht

Um den Herausforderungen durch heterogene Lernendenvoraussetzungen im Biologieunterricht angemessen begegnen zu können, sollten individuelle Lernendenmerkmale, die für das biologiebezogene Wissen und dessen Aufbau relevant sind, bekannt sein. Diese Arbeit widmet sich daher der Aufklärung solcher potenziellen Lernendenmerkmale aus drei Perspektiven. In der ersten Studie wird untersucht, ob sich die Religiosität und die konfessionelle Zugehörigkeit von Schüler:innen prädiktiv auf ihr evolutionsbezogenes Wissen sowie ihre Akzeptanz der Evolution (positive Einstellungen gegenüber Evolution) auswirken. In der zweiten Studie wird erforscht, wie sich bestimmte kognitive und motivationale biologiebezogene Lernendenmerkmale während einer Intervention zu phylogenetischen Stammbäumen darstellen und ob darin relevante Unterschiede in Hinblick auf das Lernverhalten sichtbar werden. Zudem wird unter Berücksichtigung der Lernendenmerkmale die Wirksamkeit ausgewählter Instruktionsstrategien (gestufte Lernhilfen, gestufte Prompts, gestufte Lösungsbeispiele) untersucht. Da Lernendenmerkmale nicht nur für das Lernen über Evolution relevant sind, wird in der dritten Studie ergänzend das Thema Insekten als weiterer biologischer Kontext aus dem Feld Ökologie betrachtet. In Anschluss an die erste Studie greift diese dritte Studie ebenfalls die Zielkonstrukte Wissen und Einstellungen themenbezogen auf. In dieser querschnittlich angelegten Studie werden der Bildungsstand sowie das Geschlecht als weitere Lernendenmerkmale betrachtet, die potenziell relevant für heterogene Lernendenvoraussetzungen hinsichtlich des Wissens und der Einstellungen im Biologieunterricht sind. Eine Übersicht über die drei Studien und die untersuchten Lernendenmerkmale (repräsentiert durch personenbezogene Variablen) zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1. Übersicht über die in dieser Arbeit vorgestellten Studien zur Aufklärung der potenziellen Relevanz ausgewählter Lernendenmerkmale für das biologiebezugene Wissen.

Studie	Untersuchte Zielkonstrukte	Weitere personenbezogene Variablen	Proband:innen
1	Evolutionsbezogenes Wissen mit Fokus auf natürlicher Selektion Akzeptanz der Evolution (evolutionsbezogene Einstellungen)	Religiosität Konfession	Schüler:innen der Sekundarstufe II
2	Evolutionsbezogenes Wissen mit Fokus auf phylogenetischen Stammbäumen Wirksamkeit von optional zur Verfügung gestellten Instruktionsstrategien	Vorwissen Selbstwirksamkeitserwartungen Intrinsische Motivation	Schüler:innen der Sekundarstufe II
3	Insektenbezogenes Wissen Einstellungen gegenüber Insekten	Bildungsstand Geschlecht	Schüler:innen der Sekundarstufe I und II Lehramtsstudierende mit dem Unterrichtsfach Biologie im Bachelor- und Masterstudium

5 Eigene empirische Studien

In den folgenden Kapiteln 5.1 bis 5.3 werden die Studien dieser Dissertation präsentiert. Hierzu wird jedem Manuskript eine Kurzvorstellung vorangestellt sowie die Eigenanteile an der jeweiligen Studie aufgeführt. Die Originalmanuskripte sind bereits veröffentlicht (Studie I und Studie III) oder zur Veröffentlichung angenommen (Studie II). Die Formatierung der Originalmanuskripte (z. B. die Schriftart) wurde für die Präsentation im Rahmen dieser Dissertation vereinheitlicht.

5.1 An exploratory study on students' denominations, personal religious faith, knowledge about, and acceptance of evolution (Studie I)

Die folgenden Darstellungen zu Studie I beziehen sich auf das Originalmanuskript und werden mit Genehmigung von Springer Nature reproduziert (*Reproduced with permission from Springer Nature*):

Gutowski, R., Aptyka, H., & Großschedl, J. (2023). An exploratory study on students' denominations, personal religious faith, knowledge about, and acceptance of evolution. *Evolution: Education and Outreach*, 16(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s12052-023-00187-5>.

Die Einsichtnahme der Daten, die dieser Studie zugrunde liegen, kann bei Herrn Prof. Dr. Jörg Großschedl (j.grosssc@uni-koeln.de) angefragt werden.

5.1.1 Vorstellung der Studie

Das Thema Evolution ist zentral für das Verständnis vieler biologischer Sachverhalte und aufgrund seiner Komplexität für Lernende auf verschiedenen Ebenen herausfordernd (siehe Kapitel 2.1; Graf & Hamdorf, 2012; Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, 2017; Tibell & Harms, 2017). Zum einen liegen bei Lernenden häufig fachlich inadäquate Konzepte beispielsweise über die Prozesse der natürlichen Selektion vor, die das Lernen fachlich adäquater Konzepte (hier Schlüsselkonzepte) beeinträchtigen können (z. B. Federer et al., 2015; Nehm et al., 2012). Zum anderen können wissenschaftliche Erkenntnisse zur Evolutionstheorie im Widerspruch zu religiösen Vorstellungen stehen (z. B. Barnes, Dunlop, et al., 2020). Hierbei hat sich unter anderem die Stärke der Religiosität als relevanter Faktor herausgestellt (Betti et al., 2020; Unsworth & Voas, 2018). In der fachdidaktischen Forschung wird zunehmend auch die Rolle der Konfession untersucht, da diese ergänzende Hinweise zur potenziellen Auslegung religiöser Schriften und Praktiken geben kann (z. B. Barone et al., 2014; Clément, 2015). Nehmen religiöse Personen einen Konflikt zwischen den Erkenntnissen zur Evolution und ihren persönlichen religiösen Vorstellungen wahr, kann dies zu einer verminderten Akzeptanz der

Evolution führen (z. B. Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020). Die bisherige Forschung gibt Hinweise auf einen positiven Zusammenhang zwischen dem evolutionsbezogenen Wissen und der Akzeptanz der Evolution (Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020; Sinatra et al., 2003). Da sich dieser Zusammenhang potenziell auf den evolutionsbezogenen Wissenserwerb auswirken kann, ist es wichtig die Bedeutung der Religiosität und der Konfession für das evolutionsbezogene Wissen und der Akzeptanz der Evolution zu kennen, um künftig forschungsbasiert allen Lernenden einen Zugang zu diesem Fachinhalt ermöglichen zu können. Zu diesem Zweck werden in der vorliegenden Studie die folgenden Fragen untersucht:

1. *Stehen das evolutionsbezogene Wissen, die Verwendung von Schlüsselkonzepten sowie die Verwendung von fachlich inadäquaten Konzepten in Zusammenhang mit der Akzeptanz der Evolution von Lernenden und wie äußert sich dieser Zusammenhang, wenn die Lernenden anhand ihrer Konfession unterschieden werden?*
2. *Unterscheiden sich Lernende verschiedener Konfessionen hinsichtlich ihres evolutionsbezogenen Wissens, ihrer Verwendung von Schlüsselkonzepten, ihrer Verwendung von fachlich inadäquaten Konzepten, ihrer Akzeptanz der Evolution sowie ihrer Religiosität?*
3. *Sind die Religiosität und die Konfessionen von Lernenden prädiktiv für ihr evolutionsbezogenes Wissen und ihre Akzeptanz der Evolution?*

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden die Daten von $N = 172$ Schüler:innen der Sekundarstufe II ausgewertet. Hierzu wurden die Angaben von Schüler:innen mit katholischer ($n = 84$) und evangelischer ($n = 32$) Konfession, der religiösen Zugehörigkeit zu einer muslimischen Glaubensrichtung ($n = 28$), sowie konfessionslosen Schüler:innen ($n = 28$) verglichen. Neben den Angaben zur Konfession wurden die Religiosität, das allgemeine evolutionsbezogene Wissen und die Verwendung von sogenannten Schlüsselkonzepten sowie fachlich inadäquaten Konzepten im Themenbereich der natürlichen Selektion erhoben.

5.1.2 Eigenanteile

Die erste Studie dieser Dissertation wurde von Prof. Dr. Jörg Großschedl konzipiert und durchgeführt. Im Rahmen einer geteilten Erstautorinnenschaft erfolgte die Datenanalyse, das Verfassen des Manuskripts, die Erstellung von Visualisierungen sowie die Einreichung des Manuskriptes gemeinsam durch Roxanne Gutowski und Dr. Helena Aptyka. Das Manuskript wurde von allen Autor:innen überarbeitet. Prof. Dr. Jörg Großschedl übernahm die Betreuung.

5.1.3 *Originalmanuskript zu Studie I*

An exploratory study on students' denominations, personal religious faith, knowledge about, and acceptance of evolution

Roxanne Gutowski, Helena Aptyka and Jörg Großschedl

Abstract

Background The theory of evolution serves as an overarching scientific principle for all areas of biology. Hence, knowledge about and acceptance of evolution are indispensable for holistic education. However, the levels of knowledge about and acceptance of evolution vary greatly. It is supposed that insufficient knowledge and lack of acceptance are associated with high personal religious faith and affiliated denominations. Therefore, it is fundamental to examine knowledge about and acceptance of evolution, personal religious faith, and denomination.

Results We conducted an exploratory study with German upper secondary school students ($N = 172$). Firstly, the results showed a weak to moderate correlation between knowledge about and acceptance of evolution. Secondly, students of different denominations differed in their knowledge about evolution, use of key concepts, acceptance of evolution, and personal religious faith but not in their use of misconceptions. Thirdly, the findings revealed that a student's denomination predicts knowledge level, whereas personal religious faith predicts acceptance.

Conclusions Our exploratory study indicates that, in addition to the strength of personal religious faith, the denomination may be critical to knowledge about and acceptance of evolution.

Keywords Acceptance, Concept, Contextual reasoning, Denomination, Education, Evolution, Evolutionary knowledge, Faith, Religiosity, Secondary school students

Introduction

Biological evolution (in the following referred to as evolution) is the explanatory theory for the development of living nature, with natural selection as the key mechanism for the development of species (German National Academy of Sciences Leopoldina 2017). An understanding of evolutionary processes is an essential requirement for students' active and educated participation in social discourse on topics such as species extinction due to climate change or the adaptation of vaccines due to the mutation of viruses (Council of Europe 2007; Dunk et al. 2019; Smith 2010). Therefore, understanding of evolution has societal value (e.g., Brasseur 2007; German National Academy of Sciences Leopoldina 2017) and is elementary to educational

curricula (e.g., Department for Education [England] 2014; Ministry for School and Education of North Rhine-Westphalia 2013). Evolution and the underlying process of natural selection are important learning contents, but they are difficult for students to understand and reason about it (Beniermann 2019; Fenner 2013; Kuschmierz et al. 2020b; Lammert 2012). Further difficulties arise from students' conceptions about evolution, which often consist of a mixture of scientific facts or key concepts and naive ideas or misconceptions (Opfer et al. 2012). To address misconceptions and strengthen scientific understanding of evolution and the use of key concepts, it is necessary to examine factors related to or predictive of students' knowledge about evolution. Studies suggest that knowledge is positively associated with a high level of acceptance (e.g., Großschedl et al. 2018; Kuschmierz et al. 2020b). Furthermore, knowledge acquisition could be inhibited by alternative explanations or beliefs, such as religious views (Dunk et al. 2019).

However, it is not fully understood how the interplay between these alternative explanations or beliefs, the knowledge about and acceptance of evolution is constituted. Moreover, it is unknown, to what extent these variables are predictive of knowledge about and acceptance of evolution (Dunk et al. 2019; Smith & Siegel 2016). Previous studies of individuals' religious characteristics commonly only collected data on the construct of personal religious faith and disregarded denominations. Consequently, this study investigates whether and to what extent personal religious faith and denominations predict knowledge about and acceptance of evolution. Additionally, this study assesses whether and to what extent the two variables lead to differences in reasoning about evolutionary processes of natural selection. Our findings support previous results on personal religious faith and the relation between knowledge about and acceptance of evolution of different denominations of German secondary school students. The findings can be used to inform educators about potential barriers of students learning evolution. Our recommendations focus on the importance of educators' awareness of religious groups and the position of their views in evolution lessons. Based on our findings, educators can derive teaching approaches that create a learning environment in which students can bring their religious views in accordance with knowledge about evolution in a scientifically compliant manner. Such approaches could focus on a more agnostic than an atheistic view of evolution to help students with the often-suggested reconciliation of religious and scientific views (e.g., Barnes 2020b, 2021b; Truong 2018).

Background

Knowledge about evolution, key concepts, and misconceptions

Knowledge about evolution is the basis for understanding evolution (Anderson et al. 2001; Bloom et al. 1956; Kuschmierz et al. 2020b; Smith & Siegel 2016). In particular, knowledge about the evolutionary process of natural selection is widely studied for students' use of key concepts and misconceptions. Key concepts constitute scientific ideas (Opfer et al. 2012). They are divided into three core concepts (variation, heritability, and individual fitness; Nehm & Ha 2011), which are essential for a scientifically correct explanation of evolutionary change and can be complemented by additional concepts (e.g., resource limitation) that allow for a more in-depth explanation (Bishop & Anderson 1990; Nehm & Reilly 2007).

The counterparts of key concepts are misconceptions, which are defined as inaccurate (Nehm et al. 2010), nonnormative (Opfer et al. 2012), or naive ideas (Federer et al. 2015; Nehm & Ha 2011) and may result from cognitive biases (Heddy & Sinatra 2013; Kelemen 2011). Previous research has shown that misconceptions are already developed in childhood. Subsequent attempts to clarify these misconceptions through scientific explanations encounter great resistance (Bloom & Weisberg 2007; Kuschmierz et al. 2020b). Moreover, key concepts and misconceptions can co-exist (Opfer et al. 2012). Students' most common misconceptions are based on teleological ideas (or finalism; the assumption that evolution is purposeful), intentionality (the assumption of the intentional, active adaptation of individuals to new situations), and essentialism (the assumption of fixed categories based on an immutable essence, which creates the illusion that the evolutionary emergence of new species from different ancestors is impossible; e.g., Beniermann 2019; Kelemen 2011; Opfer et al. 2012; Sinatra et al. 2008; Smith 2010).

Studies investigating the knowledge about evolution of German secondary school students are still rare (Kuschmierz et al. 2020b). There are indications that students possess very low to moderate knowledge about evolutionary processes and concepts (Beniermann 2019; Fenner 2013; Kuschmierz 2020a, 2020b; Lammert 2012) and continue to use misconceptions after learning about evolution (Lammert 2012).

Conceptual ecology

The conceptual ecology model offers an explanation for understanding how people interpret information through individual frames. A person's conceptual ecology may contribute to the person's difficulties to develop or transform a preliminary understanding of a particular topic

(Park 2007; Posner & Strike 1992; Strike & Posner 1982). Thus, acquiring knowledge or accepting scientific facts can be the result of several considerations which differ based on the individual prerequisites (e.g., knowledge, attitudes, and epistemological beliefs; Deniz et al. 2008). The conceptual ecology model explains interactions between personal prerequisites and their impact on knowledge development (e.g., learning about evolution and the acceptance of it; Deniz et al. 2008; Park 2007). Therefore, it can be assumed that a person's religious characteristics, consisting of the personal religious faith and the denomination, are relevant to knowledge about and acceptance of evolution (Deniz et al. 2008; Großschedl et al. 2014; Kuschmierz et al. 2021).

Acceptance of evolution

In a cross-country public opinion survey of the Eurobarometer, participants were asked whether they agree with the statement “[h]uman beings, as we know them today, developed from earlier species of animals” (European Commission 2021). Similar surveys, using the same item, were conducted with participants in the United States (Miller et al. 2006, 2022). The international comparison of acceptance scores shows that the acceptance of human evolution in Germany is rather high. For example, 66% of the participants in Germany and 53% in the United States accept human evolution as true (European Commission 2021; Miller et al. 2022). The results on German participants reflect the average European acceptance (67%; European Commission 2021). Compared to an earlier Eurobarometer survey of Germany's public acceptance of human evolution in 2005, the acceptance has declined by 3% (Directorate General Press and Communication 2005). However, the acceptance of human evolution is usually lower compared to the acceptance of the general or animal evolution when human evolution is excluded (Everhart & Hameed 2013; Unsworth & Voas 2018).

It is assumed that these differences in acceptance are, among other things, linked to the level of knowledge about evolution or personal religious faith (Dunk et al. 2017; Ha et al. 2012). However, it must be critically noted that further research indicates that a certain level of knowledge must be present in students for the connection between acceptance and knowledge to be significant. Especially younger and more inexperienced students in Germany partly revealed only a low positive correlation between knowledge about and acceptance of evolution (Beniermann 2019; Fenner 2013; Kuschmierz et al. 2020b; Lammert 2012; Southerland & Sinatra 2005).

Personal religious faith

Personal religious faith often referred to as religiosity, is “the degree to which religious faith and conviction have an impact on daily life” (Dunk et al. 2017, p. 2). European studies suggest a negative, mostly strong correlation between personal religious faith and acceptance of evolution and assume that personal religious faith is a predictor of acceptance of evolution (e.g., Großschedl et al. 2014; Kuschmierz et al. 2020b). Previous research shows that there is evidence that personal religious faith is negatively related to knowledge about evolutionary processes of natural selection but even more strongly related to acceptance of evolution. Furthermore, it was found that the religiosity of students is a significant predictor of their acceptance of evolution (Barnes et al., 2017a). These findings are consistent with the majority of studies, claiming that non-religious people or ones with low personal religious faith have higher evolution acceptance scores than (strongly) religious people (Betti et al. 2020; Unsworth & Voas 2018).

However, there is not necessarily a correlation, as personal religious faith does not always lead to lower acceptance of evolution. This argument is underlined by studies showing that religious people, both from the scientific community and the general population, accept evolution (Ecklund & Scheitle 2014; Everhart & Hameed 2013; Martin 2010).

Denominations and religious affiliations

According to the conceptual ecology model, a person’s preconditions can affect information processing and, thus, knowledge building. As aforementioned, there is an indication that a person’s personal religious faith can impact the knowledge about and acceptance of evolution. However, as denominations represent different interpretations of faith, including a person’s views, values, and prioritization, the denomination might also be a relevant factor.

Barone et al. (2014) present evidence that a person’s denomination is more predictive of acceptance of evolution than of knowledge about it. In this context, previous studies show that atheists have the highest acceptance scores while, for example, people of Christian or Muslim denominations tend to have lower scores (e.g., Betti et al. 2020; Unsworth & Voas 2018). Barnes et al. (2021a) showed in an American context that undergraduates with a Muslim denomination tended to have a lower acceptance of evolution than undergraduates of other denominations. These results were confirmed in studies examining German secondary school students, where students from a Muslim denomination had the lowest acceptance rate and even differed significantly from Protestants, who had the second-lowest acceptance rate (Fenner

2013; Lammert 2012). However, when comparing these results, it is important to note that the population proportions and faith interpretation vary depending on the studied region. For instance, the Christian communities in Germany and the United States differ, as Protestants in Germany are mainly Lutheran, Reformed, and United (Evangelical Church in Germany 2016). At the same time, Evangelicals are the largest Protestant group in the United States (Pew Research Center 2007) and are known for often interpreting the bible literally (Schneider 2020). Since both the strength of the personal religious faith and denomination shape the subjective perspective and how scientific knowledge about evolution is filtered (Clement 2015a, 2015b), both must be considered in analyses to understand inconsistencies (Glaze & Goldston 2015).

The present study and research questions

Based on the theoretical background, we deliberately conducted this study in Germany. Germany provides a wide cultural diversity, as reflected by the approximately 26% of Germans with an immigrant background (Federal Ministry of the Interior Building and Community 2019). This cultural diversity allows us to consider different perspectives on evolution using different religious characteristics such as denominations. Furthermore, Germany is a secular state that protects religious freedom and allows students to participate in religious education with state-trained religious teachers as part of their schooling (though mainly for Catholic and Protestant students). In 2020, the majority of the German population was Christian (26.7% Catholics, 24.4% Protestants, 1.8% Orthodox), and around 5–6% were Muslims (divided into 74% Sunni, 8% Alevi, 4% Shiite, 14% others/unknown; Federal Ministry of the Interior and Home Affairs 2022; Federal Office for Migration and Refugees and German Islam Conference 2020). The remaining Germans were atheists or belonged to a different, marginally represented denomination of other religions (e.g., Judaism, Hinduism, or Buddhism). One must note that the terms religious affiliation and denomination are not always adequately delineated, so that Catholics and Protestants (denominations), and Muslims (religious affiliation) are referred to as denominations. However, it is important to distinguish between the terms religious affiliation (e.g., Christianity, Islam) and denomination (Christian denominations: e.g., Catholic, Protestant; Muslim denominations: e.g., Sunni, Shiite) as they describe different levels of the characteristics of religion. Thus, we will use the term *Muslim denominations* instead of *Muslim* to refer to a group of people who belong to one of its denominations. In general, denominations can be subdivided into further sub-denominations. However, for this study, a further subdivision is impractical because the sample sizes would be very small, impairing the statistical significance. Additionally, the subgroups of some denominations are relatively similar. To

exemplify this, the Protestant Church in Germany amalgamates Lutheran, Reformed, and United denominations. This union of the Protestant Church in Germany includes a common synod, council, and church conference and thus represents common values and principles which are based on the Gospel (Evangelical Church in Germany 2021). Therefore, a distinction between the sub-denominations in Germany can be dispensed (this need not apply to other states, e.g., the ones of the United States).

We recognize that personal religious faith and denominations may be viewed as sensitive personal character traits which may result in a critical perspective on studies about them. We hereby clearly position ourselves that we appreciate cultural diversity and that we aim to promote educational equality for all students. We emphasize that we strongly oppose the creation of negative images of individuals or stereotyping groups, for instance, based on their denominations. However, for research purposes, it is crucial to identify whether a student's personal religious faith or denomination is a decisive factor for knowledge about and acceptance of evolution. Moreover, it helps to acquire a more profound understanding of potential barriers (e.g., due to conflicting religious views) that detract from educational equality. Also, it fosters researchers', educators', and the general readers' sensitivity to the topic.

Based on the findings of previous studies and the sociocultural factors in Germany, we aim to examine whether German upper secondary school students' personal religious faith and denomination are relevant to their knowledge about and acceptance of evolution. We expect to gain a more profound understanding of potential barriers (e.g., due to conflicting religious views) to knowledge and thereby strengthen educational equality. The study indirectly fosters readers' sensitivity to possible tensions between religious views and evolution. Considering the above, we set out to examine the following research questions:

1. Is there a correlation between the three variables of knowledge about evolution, use of key concepts, and use of misconceptions with the acceptance of evolution among students, and how do they correlate when separated by denominations?
2. Is there a difference in knowledge about evolution, use of key concepts and misconceptions, acceptance of evolution, and personal religious faith among students with different denominations?
3. Are personal religious faith and different denominations predictive of the knowledge about and acceptance of evolution?

Methods

Sample

For this study, we analyzed a data set of $N = 172$ upper secondary school students, also used as part of a previous study by Aptyka et al. (2022). We deployed this subset because the participants provided additional information regarding their denominational group. The participants were 16.5 years of age ($SD = 1.1$), and 63.7% reported being female. They attended secondary schools, divided into grammar school (*Gymnasium*), comprehensive school, or vocational training, and were in grades 10–13 ($M = 11.0$, $SD = 0.9$). The International Standard Classification of Education (ISCED) classifies all surveyed school types at level ISCED3 (Eurydice 2021).

The participants reported being Protestant ($n = 32$), Catholic ($n = 84$), of a Muslim denomination ($n = 28$), or atheistic ($n = 28$). The four *denominational groups* reflect the largest groups in the socio-demographic profile of Germany (see the “The Present Study and Research Questions” section; Federal Ministry of the Interior and Home Affairs 2022; Federal Ministry of the Interior Building and Community 2019; Federal Office for Migration and Refugees and German Islam Conference 2020). There was no further differentiation of the Muslim denominations. Based on the socio-demographic profile of Germany, we anticipate that the majority of the Muslim participants belong to the Sunni denomination (Federal Office for Migration and Refugees and German Islam Conference 2020). It can be assumed that Catholic participants belong to the Roman Catholic Church since this represents the majority (Catholic Church in Germany 2020; Evangelical Church in Germany 2021; Federal Ministry of the Interior and Home Affairs 2022). The group of Protestants was not divided into further sub-denominations, as the Protestant Church in Germany already grouped them due to similar characteristics (for further explanations, see “The present study and research questions”) section. We are aware that it is difficult to draw generic conclusion from statistical analyses based on such small samples and therefore like to emphasize that our research entails exploratory characteristics. Therefore, the implications gained for research and teaching must be considered critically (for more details, see “Limitations”) section. Nevertheless, since we analyze a variety of variables (knowledge about and acceptance of evolution, personal religious faith and denomination) in this study, it provides valuable information for evaluating different variables (e.g., considering socio-economic status) for further research.

Research design and procedures

The survey was conducted in the students' regular environment to ensure ecological validity. First, students' general evolution-related knowledge, acceptance of evolution, personal religious faith, denomination, and sociodemographic data were collected. After an intervention on natural selection (for further information, see also Aptyka et al. 2022), students' conceptual knowledge was assessed by assigning them four tasks in which they had to explain the processes of natural selection in different scenarios. We varied the order of the four tasks to reduce the impact of fatigue effects, as it could diminish the last tasks (sequencing effects; Aptyka et al. 2022; Federer et al. 2015).

Measures

Knowledge about evolution (KAEVO 2.0)

The KAEVO 2.0 was initially designed to measure the knowledge about evolution of secondary school students in Germany. It was validated regarding content validity and internal structure, showing valid results in different samples (Aptyka et al. 2022; Beniermann 2019; Beniermann et al. 2021; Kuschmierz et al. 2020a). By answering true-false items and single-choice questions, students could score up to 24 points. In order to guarantee comparability of this instrument with other ones, Kuschmierz et al. (2020a) categorized the range of possible points as follows: very low knowledge (0–10 points), low knowledge (11–14 points), moderate knowledge (15–18 points), rather high knowledge (19–22 points), and high knowledge (23–24 points). Overall, the KAEVO 2.0 showed an internal consistency of Cronbach's $\alpha = 0.61$ ($M = 13.22$, $SD = 3.27$, range = 5.00–21.00).

Assessment of contextual reasoning about natural selection (ACORNS)

We used four items of the ACORNS instrument (Nehm et al. 2012; Opfer et al. 2012) to measure the students' contextual reasoning about natural selection. As the items were in English, we used the same translation as in earlier studies (Aptyka et al. 2022; Großschedl et al. 2018). The ACORNS is a constructed response instrument that examines the knowledge's free recall (Nehm & Ha 2011). Nehm et al. (2012) confirmed the convergent validity of the instrument.

Generally, the ACORNS items were designed as isomorphic items, meaning that they all have the same structure but vary in surface features of the content. In our case, the surface features of the four tasks were systematically varied regarding the taxon (animal vs. plant) and the polarity of trait change (trait gain vs. trait loss). Accordingly, the task definition read as follows:

“How would biologists explain how a living (Taxon) species with [/lacking] (Trait) evolved from an ancestral (Taxon) species that lacked [/had] (Trait)?” (Nehm et al. 2012).

The open responses of the ACORNS items were coded using the scoring guide by Nehm et al. (2010), which allows for distinguishing between key concepts and misconceptions of natural selection. In detail, we investigated the following key concepts: *variation* (presence and cause of variation); *heritability* (heritability of variation); *individual fitness* (differential survival of individuals); *resource limitation* (limited resources); *competition* (competition); and *change of population* (generational changes in the distribution or frequency of variation; e.g., Nehm et al. 2010; Opfer et al. 2012). These concepts are also the most frequently used in the study of Großschedl et al. (2018). Additionally, we analyzed the use of the following four misconceptions: *need* (needs as drivers of evolutionary processes); *use/disuse* (the use or disuse of traits); *intentionality* (the intention to change a trait actively); and *adaptation* (the active adaptation to given circumstances or the environment; Federer et al. 2015; Nehm et al. 2012, 2013; Opfer et al. 2012). In total, students could use six key concepts and four misconceptions per item. Since we used four ACORNS items in this study, students could use a total of 24 key concepts ($M = 9.47$, $SD = 5.02$, range = 0–22.00) and 16 misconceptions ($M = 2.76$, $SD = 2.96$, range = 0–16.00). To ensure the reliability of the open response codings, a second trained person coded more than 30% of the data. We calculated the interrater reliability, which showed an almost perfect agreement (Cohen’s $\kappa > 0.80$; Landis & Koch 1977; O’Connor & Joffe 2020).

Attitudes towards evolution (ATEVO 2.0)

We used the ATEVO 2.0 scale to collect data about a person’s attitude toward evolution (Beniermann 2019). The initial validation of this instrument was carried out using statistical analyses such as principal component analysis, which were used to determine and confirm internal validity (Beniermann 2019). This instrument contains eight items on a 5-point Likert scale relating to the human mind and general attitudes toward evolution. Low values indicate a negative attitude towards evolution (rejection), while high values signify a positive attitude (acceptance; Beniermann 2019). The instrument revealed an internal consistency of Cronbach’s $\alpha = 0.63$ ($M = 3.97$, $SD = 0.51$, range = 2.75–5.00).

Personal religious faith (PERF 2.0)

The PERF 2.0 scale enables the assessment of data about the strength of students’ personal religious faith (Beniermann 2019). The validation process of this instrument was guided by the expertise of academics from related research disciplines such as theology, philosophy, and

sociology. They reviewed and refined the instruments' wording to ensure content validity (Apytyka et al. 2022; Beniermann 2019). The PERF 2.0 encloses ten items on a 5-point Likert scale. High scores represented a high level of personal religious faith. The scale showed an excellent internal consistency of Cronbach's $\alpha = 0.96$ ($M = 2.64$, $SD = 1.27$, range = 1.00–5.00).

Data analysis

We used IBM SPSS Statistics (version 28.0) for the data analyses. Initially, we performed preliminary analyses (e.g., comparability of group sizes, extreme outliers, normal distribution, homogeneity of variances) to select the correct statistical analysis for the respective data characteristics. Descriptive statistics were used for sample specification. In addition, we analyzed the data using inferential statistical procedures (e.g., correlations, regression, and analyses of variances). Corresponding to the results of preliminary analyses, we used a non-parametric test (e.g., the Kruskal-Wallis test with the Dunn- Bonferroni post-hoc test) when the data did not meet the criteria for performing parametric tests. Moreover, we adjusted the test procedure for post-hoc analyses with the Bonferroni post-hoc test when the dependent variables of the compared groups showed homogeneity of variance. We applied the Games-Howell post-hoc test when variances were heterogeneous. Both post-hoc analyses promise the advantage of being robust against an unbalanced design (Field 2018). Multiple linear regressions were performed using dummy coded variables for the denominational groups (Protestant [vs. atheistic], Catholic [vs. atheistic], and Muslim denominations [vs. atheistic]). Partial responses were missing in the query for the four ACORNS items, whereby some participants were automatically excluded from the analyses. Consequently, a few values are missing at random (MAR). For all analyses, we set the significance level to 5%.

Results

The relationship between knowledge about and acceptance of evolution among students (of different denominations)

For our first research question, we conducted a Pearson product-moment correlation analysis and examined how strongly students' knowledge about and acceptance of evolution are related. The results show weak to moderate correlations between students' acceptance of evolution with knowledge about evolution with their acceptance of evolution ($r = .22$, $p = .003$) and the number of used key concepts ($r = .26$, $p < .001$; see Table 1). The number of used misconceptions and acceptance do not show a significant correlation. For Protestants, we found a relatively strong correlation between acceptance and key concept use ($r = .46$, $p = .008$). We did not find

that the other denominational groups' acceptance was significantly related to knowledge about evolution, the use of key concepts, or misconceptions.

Table 1 Relationship between knowledge about, and acceptance of evolution separated by denominational groups

	Sample (<i>N</i> = 172)	Separation of the sample by denominational groups			
		Protestant (<i>n</i> = 32)	Catholic (<i>n</i> = 84)	Muslim de- nominations (<i>n</i> = 28)	Atheistic (<i>n</i> = 28)
Knowledge about evolution	.22**	.20	.10	.28	.21
Key concepts	.26**	.46**	.16	.17	.06
Misconception	-.01	-.12	-.12	.12	.17

** $p < .01$

Differences between students with different denominations in their knowledge about evolution, use of key concepts and misconceptions, acceptance of evolution, and personal religious faith

To address our second research question, we examined whether students of different denominations differ in their knowledge about evolution, use of key concepts and misconceptions, acceptance of evolution, and personal religious faith.

Firstly, we conducted an analysis of variance to examine the knowledge about evolution for different denominational groups. Results reveal that students' knowledge about evolution differs between the denominational groups, $F(3, 168) = 3.62$, $p = .014$, $\eta_p^2 = .06$. Bonferroni's post-hoc tests of knowledge about evolution show significant differences between the denominational groups' Muslim denominations and atheistic, $p = .018$ ($M_{\text{Diff}} = -2.57$, 95%-CI[-4.85, -0.29], $d_{\text{Cohen}} = 0.92$). These results mean for our sample that students of Muslim denominations scored lower than the atheistic students on the KAEVO 2.0 and thus held less knowledge about evolution. We did not observe differences between students of the denominational groups Protestant and Catholic, $p > .99$ ($M_{\text{Diff}} = 0.35$, 95%-CI[-1.42, 2.13]), Protestant and Muslim denominations, $p = .054$ ($M_{\text{Diff}} = 2.19$, 95%-CI[-0.02, 4.40]), Protestant and atheistic, $p > .99$ ($M_{\text{Diff}} = 0.38$, 95%-CI[-2.59, 1.83]), Catholic and Muslim denominations, $p = .056$ ($M_{\text{Diff}} = 1.83$, 95%-CI[-0.03, 3.70]), Catholic and atheistic, $p > .99$ ($M_{\text{Diff}} = -0.74$, 95%-CI[-2.60, 1.13]).

Secondly, we used descriptive and inferential statistics to analyze which key concepts and misconceptions students (of different denominations) use when reasoning about natural selection. Descriptive statistics for the sample suggest that students used more key concepts than misconceptions when reasoning about natural selection. Students used the concept of resource limitation most often, followed by the concepts of variation, individual fitness, and heritability. In addition, it appears that students in both groups applied the misconception of adaptation most frequently and the misconception of intentionality least frequently (see Fig. 1).

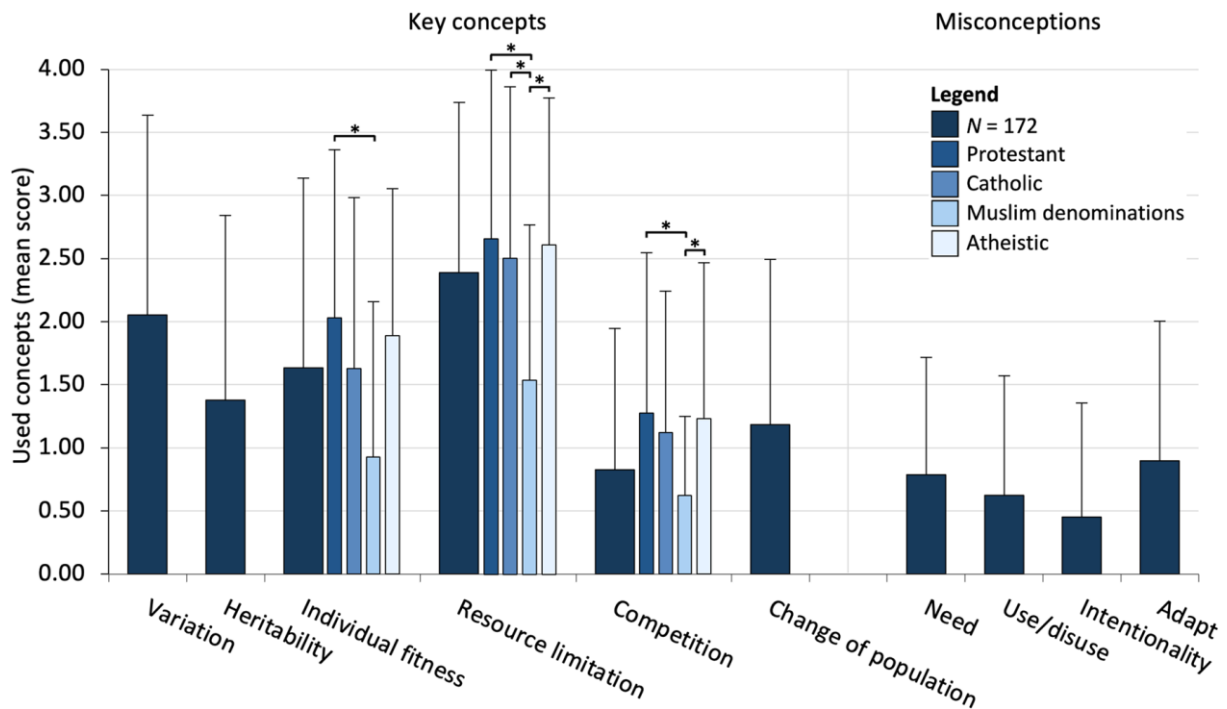


Fig. 1 Students' use of key concepts and misconceptions when reasoning about natural selection. The figure shows the key concepts (left) and misconceptions (right) that were used by students (with different denominations) when responding to four ACORNS items ($M + SD$). Denominational representation was chosen only when significant differences were present. * $p < .05$

Procedures of inferential statistics followed the descriptive statistics. We performed two ANOVAs, one with the sum of all used key concepts and one with the sum of all used misconceptions for the denominational groups. The results show that the students of different denominational groups varied in the number of used key concepts, $F(3, 168) = 2.72, p = .046, \eta_p^2 = .05$, but not of misconceptions, $F(3, 168) = 0.91, p = .439$. To identify the explicit concepts in which the students differed, we performed a multivariate analysis of variance (MANOVA; see Fig. 1). The results reveal that students of different denominational groups differed in the use of the key concepts of individual fitness, $F(3, 168) = 3.18, p = .025, \eta_p^2 = .05$, resource limitation, $F(3, 168) = 4.91, p = .003, \eta_p^2 = .08$, and competition, $F(3, 168) = 2.80, p = .042, \eta_p^2 = .05$. The students did not significantly differ in the use of the key concepts of variation, $F(3, 168) = 0.18$,

$p = .912$, heritability, $F(3, 168) = 0.88$, $p = .453$, and change of population, $F(3, 168) = 1.49$, $p = .219$. Bonferroni's post-hoc tests regarding the key concept of individual fitness reveal a significant difference between the denominational groups Protestant and Muslim denominations, $p = .027$ ($M_{\text{Diff}} = 1.10$, 95%-CI[0.08, 2.12], $d_{\text{Cohen}} = 0.74$). The denominational groups of Protestant and Catholic, $p > .99$ ($M_{\text{Diff}} = 0.40$, 95%-CI[-0.42, 1.22]), Protestant and atheistic, $p > .99$ ($M_{\text{Diff}} = 0.14$, 95%-CI[-0.88, 1.16]), Catholic and Muslim denominations, $p = .185$ ($M_{\text{Diff}} = 0.70$, 95%-CI[-0.16, 1.56]), and Catholic and atheistic, $p > .99$ ($M_{\text{Diff}} = -0.26$, 95%-CI[-1.12, 0.60]) did not significantly differ. Bonferroni's post-hoc tests for the key concept of resource limitation show a significant difference between the denominational groups Protestant and Muslim denominations, $p = .007$ ($M_{\text{Diff}} = 1.12$, 95%-CI[0.22, 2.02], $d_{\text{Cohen}} = 0.87$), Catholic and Muslim denominations, $p = .005$ ($M_{\text{Diff}} = 0.96$, 95%-CI[0.20, 1.72], $d_{\text{Cohen}} = 0.72$), as well as Muslim denominations and atheistic, $p = .015$ ($M_{\text{Diff}} = -1.07$, 95%-CI[-2.00, -0.14]; $d_{\text{Cohen}} = 0.89$) but no differences for the denominational groups Protestant and Catholic, $p > .99$ ($M_{\text{Diff}} = 0.16$, 95%-CI[-0.57, 0.88]), Protestant and atheistic, $p > .99$ ($M_{\text{Diff}} = 0.05$, 95%-CI[-0.85, 0.95]), and Catholic and atheistic, $p > .99$ ($M_{\text{Diff}} = -0.11$, 95%-CI[-0.88, 0.65]). Games-Howell's post-hoc tests for the key concept of competition reveal a significant difference between the denominational groups Protestant and Muslim denominations, $p = .037$ ($M_{\text{Diff}} = 0.71$, 95%-CI[0.03, 1.38], $d_{\text{Cohen}} = 0.67$), Muslim denominations and atheistic, $p = .031$ ($M_{\text{Diff}} = -0.75$, 95%-CI[-1.45, -0.05], $d_{\text{Cohen}} = 0.77$). Students of the denominational groups Protestant and Catholic, $p = .728$ ($M_{\text{Diff}} = 0.26$, 95%-CI[-0.41, 0.94]), Protestant and atheistic, $p = .999$ ($M_{\text{Diff}} = -0.04$, 95%-CI[-0.90, 0.81]), Catholic and Muslim denominations, $p = .052$ ($M_{\text{Diff}} = 0.44$, 95%-CI[-0.00, 0.88]), and Catholic and atheistic, $p = .642$ ($M_{\text{Diff}} = -0.31$, 95%-CI[-1.01, 0.39]) show no significant differences.

Thirdly, we conducted an ANOVA to examine the dependent variable acceptance of evolution and the independent variable denominational groups. We found that students of different denominations show varying levels of acceptance of evolution, $F(3, 168) = 6.07$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .10$. By applying a post-hoc Bonferroni test, we precisely observed differences between the denominational groups Protestant and Muslim denominations, $p = .011$ ($M_{\text{Diff}} = 0.52$, 95%-CI[0.18, 0.87], $d_{\text{Cohen}} = 0.78$) and Muslim denominations and atheistic, $p < .001$ ($M_{\text{Diff}} = -0.52$, 95%-CI[-0.87, -0.18], $d_{\text{Cohen}} = 1.05$) but not between Protestant and Catholic, $p > .99$ ($M_{\text{Diff}} = 0.14$, 95%-CI[-0.13, 0.41]), Protestant and atheistic, $p > .99$ ($M_{\text{Diff}} = -0.13$, 95%-CI[-0.46, 0.21]), Catholic and Muslim denominations, $p = .090$ ($M_{\text{Diff}} = 0.26$, 95%-CI[-0.02, 0.55]), and Catholic and atheistic, $p = .088$ ($M_{\text{Diff}} = -0.26$, 95%-CI[-0.55, 0.02]). Thus,

students of the Muslim denominations in our samples are rather inclined to reject the evolution than Protestant and atheistic students.

Fourthly, we analyzed the dependent variable personal religious faith, with the independent variable denominational groups using a non-parametric Kruskal–Wallis test. We found that the students of different denominational groups differed in personal religious faith, $H(3) = 72.74$, $p < .001$. The following Dunn-Bonferroni post-hoc tests indicate that the denominational groups Protestant and Muslim denominations ($z = -5.15$, $p < .001$, $p_{adj} < .001$, $d_{Cohen} = 2.06$), Protestant and atheistic ($z = -3.56$, $p < .001$, $p_{adj} = .002$, $d_{Cohen} = 1.19$), Catholic and Muslim denominations ($z = -6.07$, $p < .001$, $p_{adj} < .001$, $d_{Cohen} = 1.93$), Catholic and atheistic ($z = -4.26$, $p < .001$, $p_{adj} < .001$, $d_{Cohen} = 1.13$), and Muslim denominations and atheistic ($z = -8.44$, $p < .001$, $p_{adj} < .001$, $d_{Cohen} = 5.45$) significantly differed in their level of personal religious faith. The only data not showing significant differences are between the groups Protestant and Catholic ($z = -0.04$, $p = .968$, $p_{adj} > .99$). Overall, we can conclude from the results that students of Muslim denominations have the lowest acceptance of evolution, and atheistic students have the highest (see Table 2). In addition, the descriptive results show that the acceptance scores are moderate to high in all groups (at least 3.7 on a 5-point Likert scale).

Table 2 Means and standard deviations for the knowledge, acceptance, concept use, and personal religious faith

	Separation of the sample by denominational groups				
	Sample (<i>N</i> = 172)	Protestant (<i>n</i> = 32)	Catholic (<i>n</i> = 84)	Muslim de- nominations (<i>n</i> = 28)	Atheistic (<i>n</i> = 28)
	<i>M</i> (<i>SD</i>)	<i>M</i> (<i>SD</i>)	<i>M</i> (<i>SD</i>)	<i>M</i> (<i>SD</i>)	<i>M</i> (<i>SD</i>)
KAEVO 2.0	13.22 (3.27)	13.69 (3.43)	13.33 (3.36)	11.50 (3.12)	14.07 (2.40)
ATEVO 2.0	3.99 (0.51)	4.10 (0.53)	3.96 (0.47)	3.70 (0.49)	4.22 (0.50)
PERF 2.0	2.64 (1.27)	2.50 (1.12)	2.52 (1.06)	4.38 (0.59)	1.45 (0.48)
ACORNS KC	9.47 (5.02)	10.69 (5.84)	9.70 (4.88)	7.18 (4.61)	9.64 (4.32)
ACORNS MIS	2.76 (2.96)	2.31 (2.83)	3.02 (2.94)	2.18 (2.79)	3.04 (3.32)

KAEVO 2.0 Knowledge about evolution 2.0; *ATEVO 2.0* Attitudes towards evolution 2.0; *PERF 2.0* Personal Religious Faith 2.0; *ACORNS KC* Assessment of contextual knowledge about natural selection (key concepts); *ACORNS MIS* Assessment of contextual knowledge about natural selection (misconceptions)

Prediction of the knowledge about and acceptance of evolution

Finally, we aimed to investigate how much of the variance in the knowledge about and acceptance of evolution can be explained by the predictors of personal religious faith and denomination. We conducted a multiple linear regression for the criterion knowledge about evolution measured by the KAEVO 2.0, which shows a small goodness-of-fit (Cohen 1988), $R^2 = .06$ ($R^2_{\text{adj}} = .04$). The model with the denominational groups Protestant (vs. atheistic), Catholic (vs. atheistic), Muslim denominations (vs. atheistic), and the personal religious faith significantly predicts the knowledge about evolution, $F(4, 167) = 2.70$, $p < .032$. Nevertheless, only the group Muslim denominations (vs. atheistic) is a significant predictor ($B = -2.55$, $\beta = -0.29$, $S.E. = 1.15$, $p = .028$), meaning that if a participant of our study was considered as an adherent of a Muslim denomination, the probability is higher that this individual has lower knowledge about evolution than individuals of other denominations. The denominational groups Protestant (vs. atheistic; $B = -0.38$, $\beta = -0.05$, $S.E. = 0.88$, $p = .669$), Catholic (vs. atheistic; $B = -2.55$, $\beta = -0.11$, $S.E. = 0.75$, $p = .335$), or the personal religious faith ($B = -0.01$, $\beta = -0.00$, $S.E. = 0.26$, $p = .975$) do not directly relate to students' knowledge about evolution. After analyzing knowledge about evolution, we performed a multiple linear regression analysis with the denominational groups and personal religious faith as predictors of the acceptance of evolution. The overall model is significant, $F(6, 187) = 5.22$, $p < .001$, and indicates a moderate goodness-of-fit (Cohen 1988), $R^2 = .15$ ($R^2_{\text{adj}} = .12$). Only the personal religious faith ($B = -0.12$, $\beta = -0.29$, $S.E. = 0.04$, $p = .003$) but not the denominational groups Protestant (vs. atheistic; $B = -0.00$, $\beta = -0.00$, $S.E. = 0.13$, $p = .990$), Catholic (vs. atheistic; $B = -0.14$, $\beta = -0.14$, $S.E. = 0.11$, $p = .222$), or Muslim denominations (vs. atheistic; $B = -0.18$, $\beta = -0.13$, $S.E. = 0.17$, $p = .297$) enable a significant prediction of students' acceptance of evolution. In summary, religious students across all investigated denominations are less accepting of evolution.

Discussion

Low correlations between acceptance of evolution with knowledge about evolution and the use of key concepts, but no correlation with the use of misconceptions

In order to answer our first research question, we found weak to moderate correlations between knowledge about and acceptance of evolution in our sample. The correlation between knowledge about and acceptance of evolution coincides with previous findings. Low correlation among secondary school students compared to, for example, undergraduates may be

explained by differences in the educational level, age of participants, or stages of faith (e.g., Beniermann 2019; Fowler & Dell 2006; Konnemann et al. 2012; Kuschmierz et al. 2020b). The identified correlation could also suggest that younger students do not perceive a conflict between scientific and religious views. The absence of conflict could be due to our sample's low level of knowledge. Low knowledge prevents students from understanding the overlaps or contradictions of scientific and religious views on evolution. Also, separating the subjects in school (i.e., biology or religion courses) and the missing interdisciplinary link can prevent the simultaneous confrontation of elaborated scientific and religious perspectives, obscuring potential conflicts. As knowledge becomes more differentiated, diverging perspectives on evolution might not be compatible anymore. Then, the decision to accept evolution, understand religious and biological views as Non-Overlapping Magisteria (NOMA; Gould 1999), or reject evolution seems almost inevitable (Sinatra et al. 2003).

Contrary to our expectations, only the number of used key concepts in our sample is significantly related to acceptance, but the number of used misconceptions is not. Students' use of misconceptions in reasoning about natural selection in the ACORNS instrument by the surveyed participants in our study correlated slightly negatively with the acceptance of evolution, but unlike the results by Großschedl et al. (2018), our results were insignificant. These findings support the argument of previous studies that key concepts and misconceptions are not mutually exclusive and that students can have key concepts and misconceptions simultaneously (e.g., Aptyka et al. 2022; Evans 2001; Opfer et al. 2012).

Differences among students of different denominations in knowledge about, and acceptance of evolution, use of key concepts, and personal religious faith

We examined whether students of different denominations in our sample differed in their knowledge about evolution, use of key concepts and misconceptions, acceptance of evolution, and personal religious faith. The analyses revealed that students of Muslim denominations differed greatly from atheists in terms of general knowledge about evolution and from Protestants and atheists regarding acceptance of evolution. These explorative results are similar to those of Beniermann (2019) and Lammert (2012) on German students, who showed that Protestants and students of Muslim denominations differed strongly in their knowledge about evolution and moderately in their acceptance of evolution. Explanatory approaches suggest that the poor performance of certain denominations in knowledge surveys is attributable to prevalent negative stereotypes and prejudices about their scientific competence (Rios et al. 2015). In addition, there are attempts to explain low acceptance scores by a possible lack of importance of

evolution to some denominations (Betti et al. 2020; Unsworth & Voas 2018). Also, the theory of evolution is often associated with atheism (Everhart & Hameed 2013). Overall, the students in our study showed low general knowledge (Kuschmierz et al. 2020a).

In our study, students most often used the key concept of resource limitation, followed by the three core concepts of variation, heritability, and individual fitness. The dominant use of these concepts could be associated with the intervention. Nevertheless, the results are similar to findings in America (Nehm & Ha 2011; Nehm et al. 2010; Opfer et al. 2012) and a comparable frequency of use of the key concepts of individual fitness, resource limitation, and variation by German university students (Großschedl et al. 2018). The key concept of resource limitation might have occurred relatively often in this specific sample as it is a less abstract and more accessible explanation for natural selection than other concepts, such as variation, which is rooted in molecular biology (Tibell & Harms 2017).

Regarding the differentiation of denominations, we found moderate to significant differences between the key concepts used by students of different denominations. It was noticeable that students of Muslim denominations used the fewest key concepts and differed significantly from at least one denominational group in their use of individual fitness, resource limitation, and competition. The differences were most pronounced on the key concept of resource limitation because students of Muslim denominations differed significantly from all other comparison groups. The reasons for the differences in the use of key concepts and misconceptions between students of different denominations are still poorly understood. Nevertheless, the results of our explorative approach are similar to those of Rachmatullah et al. (2018) regarding differences in the use of the key concept of resource limitation. They compared pre-service teachers from Indonesia (the world's largest Muslim majority) and America. They only found descriptive differences ($p = .055$) in the use of the key concept of resource limitation, with Indonesian participants using the concept less often than American participants. Because little research has been conducted on the denomination-specific use of key concepts and misconceptions, we recommend further research to assess these differences in more detail.

In this examined sample, misconceptions occurred less often than key concepts and did not dominate responses. These results oppose the ones of Lammert (2012). Purely descriptively, students in our sample used the misconception of adaptation most frequently. Our result is in accordance with earlier qualitative findings showing that German upper secondary school students explained the evolutionary change as an intentional, active change of an organism (Baalmann et al. 2004). However, our findings differ from those of German university students, who

most frequently used the misconception of need (Großschedl et al. 2018). This contrast may indicate an argumentative shift from younger students using internal, active, and purposeful causes (Brennecke 2015) to older students using a more passive process with an external cause (e.g., environmental pressure) as arguments for evolutionary changes. Furthermore, the misconception of adaptation often includes aspects of teleological reasoning (Kuschmierz et al. 2020b). Students might have resorted to teleological reasoning because they had to explain evolutionary change retrospectively and could have interpreted the wording of the ACORNS items as including a finalistic event with evoked start-finish-scenario. Our explorative results again support the assumption that key concepts and misconceptions co-exist (Nehm & Ha 2011; Opfer et al. 2012). For example, the argument about evolutionary change based on the key concept of resource limitation was partly followed by the argument that an individual must actively adapt (misconception) to gain higher individual fitness and be the individual that has the greatest chance of survival in the given environment (see also Großschedl et al. 2018).

Students of different denominations in our sample did not show differences in the use of misconceptions. One explanation for the missing differences in misconceptions between students of different denominations can be derived from cognitive psychological perspectives. Research in this area stated that teleological thinking, including misconceptions (e.g., need), is a pervasive feature of common human thinking, prevalent in all cultures and religions (Kelemen 2011).

Regarding personal religious faith, all denominational groups in this specific sample differed in personal religious faith except Catholics compared to Protestants. Students of Muslim denominations disclosed the highest and atheists the lowest scores in personal religious faith. These results are similar to those of Lammert (2012), showing differences between denominations and the effect of the denominations on personal religious faith for German students. Our results can be complemented by the findings of a recent survey conducted by the Federal Office for Migration and Refugees and the German Islam Conference in Germany (2020), showing that the majority of participants with a migration background stated to be strong to rather devout (approximately 82%; independent from their denomination). For the participants of Christian denominations without a migration background, the proportion of persons being strong to rather devout (approximately 55%) and being rather not or not at all devout (approximately 45%) was almost balanced (Federal Office for Migration and Refugees and German Islam Conference 2020). In relation to our results, this may suggest that personal religious faith reflects other variables that influence learning about evolution, such as cultural diversity represented by migration background. In addition, socio-economic status should also be considered since Barnes

et al. (2017a) found a correlation between students' acceptance of evolution and the parental education level as well as the parents' attitudes toward evolution to be predictive of students' acceptance of evolution.

Denominations can predict knowledge about evolution, and personal religious faith can predict acceptance of evolution

Finally, we explored how much variance in the variables of knowledge about and acceptance of evolution can be explained by students' personal religious faith and denominations. In our sample, the group Muslim denominations was a significant predictor of a lack of knowledge about evolution to a small extent, whereas personal religious faith did not. Moreover, personal religious faith predicted the acceptance of evolution moderately, whereas a person's denomination was no significant predictor. In our study, personal religious faith was only a significant predictor of acceptance of evolution but not of knowledge about evolution, even though students of Muslim denominations had the highest personal religious faith. Similarly, Dunk et al. (2017) found that the effect of the denomination variable was reduced when other factors, such as religiosity, were included. The results of our study suggest reconsidering the role of personal religious faith and denomination when investigating knowledge about evolution. Exemplarily, demographic data show that most people of Muslim denominations in Germany have a migration background (Federal Office for Migration and Refugees and German Islam Conference 2020). Furthermore, the survey conducted by the Federal Office for Migration and Refugees and the German Islam Conference revealed that around 43% of the population in Germany aged 16 and older with a migration background and a religious affiliation do not have a school-leaving qualification or own a compulsory one. In contrast, this applies only to 15–20% of the persons without a religious affiliation (with or without a migration background) or people without a migration background belonging to Christian denominations (Federal Office for Migration and Refugees and German Islam Conference 2020). These results indicate educational inequality for individual groups. Combining facts about inequality with our results may indicate systemic educational or linguistic disadvantages, like lower economic status, of specific persons that should be considered as covariates in future studies.

Our results support previous findings that personal religious faith is associated with acceptance of evolution but less with knowledge about evolution (Barnes et al. 2017a). They provide complementary evidence that people with no or low personal religious faith are more accepting of evolution than strongly religious people (Betti et al. 2020; Lammert 2012; Unsworth & Voas 2018).

In research, hypothesis suggest that attitudes towards evolution are rooted in a nation's socio-cultural and historical contexts, and therefore differences in acceptance might be greater between countries than within one country (Clement 2015a). With regard to our sample, the differences in acceptance of evolution might be further explained by the identity-protective cognition of the culturally diverse students (Barnes et al. 2021b). The identity-protection cognition "refers to the tendency of culturally diverse individuals to selectively credit and dismiss evidence in patterns that reflect the beliefs that predominate in their group" (Kahan 2017, p. 1). Therefore, some of our sample's Muslims may reject evolution as part of their group identity.

Especially for people with insufficient knowledge about evolution in our sample, there are indications that not only increasing knowledge about evolution is vital to increase acceptance. Other studies imply that a learner's willingness to overcome controversial views on evolution might be more important in increasing acceptance of evolution than knowledge (Sinatra et al. 2003). Taking this idea into consideration, not only the direct effect of the personal religious faith or denomination but also the effect mediated by the perception of conflict between personal religious faiths and the science-based perspective on evolution could impact the acceptance or rejection of evolution. Barnes et al. (2021b) found that the perception of conflict between personal religious faith (especially regarding the belief in god) and evolution is predictive of acceptance of evolution. This relation was expressed in the higher perception of conflict was associated with lower acceptance. Moreover, previous research analyzing participants' perception of conflict shows the tendency that persons of non-Catholic Christian or Muslim denominations are most likely to perceive conflict among the examined denominational groups (Barnes et al. 2021b). Transferring these findings to our results, we cannot rule out the hypothesis that low acceptance scores in our sample originated from personal religious faith, the perception of conflict between faith, and religion. An explanation may be, as Barnes et al. (2017b) have suggested, that a combination of certain denominations and personal religious faith leads to the perception of conflict. A potential perception of a conflict could explain the results concerning the students of Muslim denominations. However, it must be noted that there are country-specific differences in personal religious faith and denominations. These differences could be attributed to, for example, the strength of belief, participation in religious practices, and the level of literal interpreting of the sacred scriptures (Clement 2015b; Schneider 2020). The perception of conflict may also help to understand differing relations between personal religious faith and acceptance of evolution for other denominations. As Catholics and Protestants in our study did not differ in the degree of personal religious faith but acceptance of evolution, it would be interesting to examine whether they also differed in their perception of conflict between the

religious and scientific views and whether the perception of conflict could explain variance in the acceptance of evolution. Additionally, examining atheists' perceptions of conflict would be interesting, as previous research suggests that atheists associate evolution with an atheist perspective (Barnes et al. 2020a). Future studies should investigate the perception of conflict to make reliable statements about the relationship between denominations and personal religious faith with the acceptance of evolution.

Implications for research and education

This explorative study can be used to derive theoretical and practical implications for research in evolution education. It expands the understanding of denominational differences because we examined secondary school students of different denominations and their knowledge about evolution, use of key concepts and misconceptions, acceptance of evolution, and personal religious faith in one study.

Our results confirm a positive correlation between knowledge about and acceptance of evolution. We contributed to the research field of evolution education by exemplarily showing that the correlation between knowledge and acceptance is not as strong in our sample of secondary school students as it is for pre-service (Großschedl et al. 2018) or in-service teachers (Beniermann 2019). The results from our explorative approach provide a basis for comparison with other samples, suggesting that promoting acceptance is less important for younger individuals than for older ones (Kuschmierz et al. 2020b). Nevertheless, as we found a positive correlation between knowledge about and acceptance of evolution, facilitating acceptance could benefit all students in increasing knowledge (including the average secondary student). It is not the function of biology class to demand that students change their denomination or personal religious faith to increase acceptance (Ohly 2012). Instead, teachers should be aware that students could perceive conflicts. This perception of conflict could cause them to close themselves off from the topic of evolution, hindering the learning process (Waschke & Lammers 2012). One reason for this conflict may be the association of acceptance of evolution with atheism for which Barnes et al. (2020a) found that religious students who classify evolution as atheistic perceived higher conflict than those who classify it as agnostic Barnes et al. (2020a). The importance of the acceptance of evolution for teaching has been discussed for a long time without a clear solution being able to be established. Smith & Siegel (2016) see value in facilitating the acceptance of evolution as it combines the acquisition of knowledge with the ability to actively participate in society. Therefore, they proposed an approach with the fundamental goal of promoting the understanding of evolution. In subsequent steps, the acceptance of the students

should also be promoted with this approach. The aim of this acceptance promotion is the insight evolution being considered an appropriate scientific explanation of biological phenomena. We consider this distinction between the promotion of the scientific perspective detached from the evaluation of religious perspectives to be valuable. Therefore, recommendations rather suggest that fostering acceptance needs to be adapted to the students individually. This critical view can be justified by the fact that there are already studies showing that a forced imposition of an accepting attitude can have exactly the opposite effect and can lead to resignation (Elsdon-Baker 2015; Unsworth & Voas 2021). This should be explicitly avoided. Instead, approaches to promote acceptance of evolution in the sense of developing the willingness to learn about evolution could be to support students to reconcile their religious attitudes with the scientific view of evolution (e.g., agnostic evolution; Barnes et al. 2020b; Sinatra et al. 2003). In our sample, Protestants showed a relatively strong correlation between the use of key concepts when reasoning about natural selection and acceptance while showing an average level of personal religious faith. To validate these findings, a more extensive study with more participants representing all denominational subgroups would be valuable.

Upper secondary school students in our sample could apply key concepts in different evolutionary examples. Still, a significant number of misconceptions in students' understanding of evolution remained. To promote better scientific understanding among students, it would be helpful to contrast the differences between key concepts and misconceptions in the class and reflect on cognitive biases (e.g., Aptyka et al. 2022; Nehm et al. 2012). The frequent use of the misconception of adaptation could be due to ambiguous tests and learning situations. For future research, we suggest rephrasing the last part of the ACORNS item to a more neutral wording: "Explain this evolutionary process of change". The active form of the verb "to evolve" in the ACORNS item might have caused teleological, anthropomorphic, or intentionality misconceptions. Such reformulated items would focus on the evolutionary change process rather than a supposed active change of individuals from one species to another. As practical advice, we also recommend that educators refrain from using ambiguous wording in oral and written language (e.g., information texts or task instructions) to avoid that adaptation being understood as actively controlled by an individual instead of a passive process (Baalman et al. 2004). Therefore, it is essential to familiarize pre-service teachers with linguistic subtleties during their studies. Pre-service teachers should learn to use language purposefully to prevent or at least minimize misunderstandings and to develop a deeper understanding of complex processes of evolution.

Moreover, the results imply that students of different denominations differ in using specific concepts. These results suggest that the variable denomination is gaining importance in evolution education research. In terms of practical education, these findings imply that it might be essential to adopt learning content, especially the thematized concepts, to different individuals to provide equal support to students with denomination-specific difficulties. The varying use of key concepts by students from different denominations raises the intriguing questions of why certain concepts occur, what prior experiences they are based on, and to what extent these concepts correspond to or contradict statements in religious scriptures.

We included the denomination as an additional variable when investigating the relationship between personal religious faith and knowledge about evolution. This approach elicited that personal religious faith is not a direct predictor of knowledge. Still, particular denominations (Muslim denominations vs. atheistic) explained a small amount of the variance in the knowledge about evolution. Thus, we recommend that future studies addressing variables on religious characteristics should include the denomination to minimize the potential for biased interpretations. In addition, we confirmed that the personal religious faith of a secondary school student, rather than their denomination, predicts variance in acceptance of evolution (e.g., Kuschmierz et al. 2020b).

Our study indicates that students may differ in prior knowledge and acceptance of evolution and personal religious faith, especially when students differ in denominations. Biology teachers should consider the spectrum of individual factors related to religious characteristics to adequately respond to all students and increase everyone's learning quality. Diversity awareness is crucial for educators to reflectively classify differences in students' knowledge (e.g., Barnes et al. 2017b, 2020a; Truong et al. 2018).

It is also important to note that there is currently a considerable debate about whether the relationship between personal religious faith and acceptance of evolution may be moderated by an individual's perception of conflict between religious and scientific views (e.g., Barnes et al. 2020a, b, 2021a, b). Since the role of perception of conflict was not examined in this study, further quantitative studies are needed to complement our chosen variables with a perception of conflict and qualitative studies that analyze the emergence of this conflict.

Although there is room for optimization in the future, our findings can guide approaches for practice for sensitization of potentially perceived conflict. Pre-service teachers could benefit from a stronger focus on cultural competencies during their university education, but also in-

service teachers should be offered specialized training. For example, a clear distinction between religious and scientific views and guidance on becoming aware of and reflecting on one's conflict could be crucial for teacher preparation (e.g., Anderson 2007; Barnes et al. 2021b). It could enable educators to observe tensions between religious and scientific views and assist them in dealing with these professionally and reflectively (Dunk et al. 2019; Truong et al. 2018). These multi-perspective approaches could help reduce conflicts, prevent religious students from closing their minds to evolutionary contexts, and facilitate effective learning (Waschke & Lammers 2012). However, a certain balance of discourse must be maintained when including different perspectives in biology lessons. The instruction must focus on the biological perspective and scientific knowledge about evolution, but at the same time, educators should not force their students to change their personal religious faith or denomination (Ohly 2012).

Limitations

The limitations of the study should be considered when interpreting the results. The sizes of some denominational groups are small (around 30 persons), limiting the generalizability of these results and the exclusion of false negative errors (see the section “Discussion”). Due to the relatively small sample size in the subsamples, our study should be seen as an exploratory study in the research field. Moreover, the group sizes of the denominational groups differed significantly. The different-sized groups result from a random sample of the population in Germany. Since denominations are not evenly distributed in Germany, this is also reflected in our study. We cannot exclude that the unbalanced design may somehow biased the results. Nevertheless, we took this risk to maintain other advantages of randomized sampling (e.g., higher external validity; Döring et al. 2016). Additionally, the chosen procedures, such as the ANOVA, are robust to an unbalanced design, especially when variances are homogeneous. Furthermore, the post-hoc tests used were selected according to their suitability for unbalanced designs so that effects due to unequal group sizes could be mitigated (Field 2018).

In addition, it must be noted that the nonsignificant correlations for each denomination should be assessed with caution. We do not insist on discarding the null effects. However, since the results show significant correlations, we point out that we cannot exclude false negative errors due to the small sample sizes of the groups divided into denominations.

Overall, we recommend that studies on denominations use a cross-sectional study design, assess data of a larger sample, and use our effect to calculate the optimal sample size in an a priori calculation (Döring et al. 2016). When deciding on the suggested sample survey, two choices

should be considered. First, researchers could select a sample representing the cross-section of secondary school students, as we did, with the associated unequal distribution of denominations. Second, researchers could use non-randomized sampling and recruit the same number of respondents for each denomination. One of the advantages of our approach is maintaining the external validity; an advantage of non-randomized sampling is that it is easier to technically retain the equality of group sizes. Additionally, we recommend collecting information on students' migration status in future studies. We incorporated data from the Federal Office for Migration and Refugees and German Islam Conference (2020) to contextualize and discuss our findings. Yet, it would have been more insightful if this information was directly available for each student in the sample. It should also be noted that our results are not necessarily generalizable to other European countries, as both the predominant denominations in the various European countries and the importance of religiosity for the population differ (Becuwe & Baneth 2021; Pickel 2013).

Conclusions

This study sought to exploratively investigate the relationship between secondary school students' knowledge about and acceptance of evolution and underlying processes such as natural selection. It aimed to gain deeper insights into possible obstacles (personal religious faith, denomination) affecting this relation. Our results confirm correlations between knowledge about and acceptance of evolution. Furthermore, we identified differences in the sample regarding knowledge about evolution, use of key concepts when reasoning about natural selection, acceptance of evolution, and personal religious faith among students of different denominations, but not regarding students' use of misconceptions. Students' extensive use of misconceptions with anthropomorphic and teleological components may also indicate a need for more deliberate and well-reflected communication (e.g., the wording in tasks or educators' language use) about natural selection. Regression analyses imply that denominations could predict knowledge about evolution, and personal religious faith could predict acceptance of evolution. These results suggest that future studies that include religious characteristics variables should assess a person's denomination. Additionally, students' perceptions of conflict between religious and scientific views should be assessed to ascertain the origins of these conflicts. Overall, this study strengthens the idea that students' religious characteristics are relevant for evolution class. This may imply that educators must be aware of these variables, deal with conflicts sensitively, and guide students to find an individual reconciliation method. Future studies should qualitatively investigate the denomination-specific differences in using key concepts and misconceptions.

Qualitative research could improve knowledge about the relationship between different evolutionary key concepts, unscientific misconceptions, and religious views. It could inform about possible learning obstacles for students of different denominations.

The findings of our study provide in-depth insights into students' knowledge about evolution and suggest possible internal conflicts that may hinder the acceptance of evolution.

Acknowledgements

We would like to thank all the school and university students as well as teachers for their participation and valuable help. We thank Britta Mors (University of Cologne) for comments on the manuscript.

Author contributions

All authors contributed equally to the development of the research goals and aims. JG conceived the research design and conducted the data collection. RG and HA were responsible of writing, performing statistical analyses, and creating the figures. All authors critically reviewed previous versions of the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Availability of data and materials

The dataset supporting the conclusions of this article is not publicly available because it was collected on secondary school students. However, the dataset is available upon reasonable request from the corresponding author JG.

Declarations

Ethics approval and consent to participate

This study was conducted following school legislation, ethical principles, and procedures for the protection of research participants (Ministry of the Interior of the State of North Rhine-Westphalia 2022; National Commission for the Protection of Human Subjects of Biomedical and Behavioral Research 1979). The use of a personal code ensured anonymous merging of the materials. No rewards or payments were made to participants.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Received: 9 December 2022 **Accepted:** 9 May 2023

References

- Anderson RD. Teaching the theory of evolution in social, intellectual, and pedagogical context. *Sci Educ*. 2007;91(4):664–77. <https://doi.org/10.1002/sce.20204>.
- Anderson LW, Krathwohl DR, Airasian PW, Cruikshank KA, Maver RE, Pintrich PR, Raths J, Wittrock MC. A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives. Longman; 2001.
- Aptyka H, Fiedler D, Großschedl J. Effects of situated learning and clarification of misconceptions on contextual reasoning about natural selection. *Evol Educ Outreach*. 2022. <https://doi.org/10.1186/s12052-022-00163-5>.
- Baalmann W, Frerichs V, Weitzel H, Gropengiesser H, Kattmann U. Schülervorstellungen zu Prozessen der Anpassung—Ergebnisse einer Interviewstudie im Rahmen der Didaktischen Rekonstruktion [Students' conceptions of processes of adaptation - Results of an interview study in the context of didactic reconstruction]. *Zeitschrift Für Didaktik Der Naturwissenschaften*. 2004; 10:7–28.
- Barnes ME, Evans EM, Hazel A, Brownell SE, Nesse RM. Teleological reasoning, not acceptance of evolution, impacts students' ability to learn natural selection. *Evol Educ Outreach*. 2017a. <https://doi.org/10.1186/s12052-017-0070-6>.
- Barnes ME, Truong JM, Brownell SE. Experiences of Judeo-Christian students in undergraduate biology. *Cell Biol Educ*. 2017b. <https://doi.org/10.1187/cbe.16-04-0153>.
- Barnes ME, Dunlop HM, Sinatra GM, Hendrix TM, Zheng Y, Brownell SE. “Accepting evolution means you can't believe in god”: atheistic perceptions of evolution among college biology students. *CBE Life Sci Educ*. 2020a. <https://doi.org/10.1187/cbe.19-05-0106>.
- Barnes ME, Werner R, Brownell SE. Differential impacts of religious cultural competence on students' perceived conflict with evolution at an Evangelical university. *Am Biol Teach*. 2020b; 82:93–101. <https://doi.org/10.1525/abt.2020.82.2.93>.
- Barnes ME, Roberts JA, Maas SA, Brownell SE. Muslim undergraduate biology students' evolution acceptance in the United States. *PLoS One*. 2021a;16(8):e0255588. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255588>.
- Barnes ME, Supriya K, Zheng Y, Roberts JA, Brownell SE. A new measure of students' perceived conflict between evolution and religion (PCoRE) Is a stronger predictor of evolution acceptance than understanding or religiosity. *CBE Life Sci Educ*. 2021b. <https://doi.org/10.1187/cbe.21-02-0024>.
- Barone LM, Petto AJ, Campbell BC. Predictors of evolution acceptance in a museum population. *Evol Educ Outreach*. 2014. <https://doi.org/10.1186/s12052-014-0023-2>.

- Becuwe N, Baneth O. Special Eurobarometer 508 on Values and Identities of EU citizens. 2021; https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC126943/JRC126943_01.pdf
- Benierrmann A. Evolution—von Akzeptanz und Zweifeln. Empirische Studien über Einstellungen zu Evolution und Bewusstsein [Evolution—about acceptance and doubts. Empirical studies on attitudes towards evolution and consciousness]. 1st ed. Wiesbaden: Springer Spektrum; 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24105-6>.
- Benierrmann A, Kuschmierz P, Pinxten R, Aivelo T, Bohlin G, Brennecke J, Cebesoy U, Cvetković D, Đorđević M, Dvořáková R, Futo M, Geamana N, Korfiatis K, Lendvai A, Mogias A, Paolucci S, Petersson M, Pietrzak B, Porozovs J, Graf D. Evolution Education Questionnaire on acceptance and knowledge (EEQ)—Standardised and ready-to-use protocols to measure acceptance of evolution and knowledge about evolution in an international context (COST: European cooperation in science & technology, Ed). 2021;10.5281/zenodo.4554742
- Betti L, Shaw P, Behrends V. Acceptance of biological evolution by first-year life sciences university students. *Sci Educ*. 2020;29(2):395–409. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00110-0>.
- Bishop BA, Anderson CW. Student conceptions of natural selection and its role in evolution. *J Res Sci Teach*. 1990;27(5):415–27. <https://doi.org/10.1002/tea.3660270503>.
- Bloom BS, Engelhart MD, Furst EJ, Hill WH, Krathwohl DR. (1956). Taxonomy of educational objectives. The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain. (BS Bloom, Engelhart, MD., Furst EJ, Hill, WH, Krathwohl DR, Ed. 1st ed.). David McKay Company, Inc.
- Bloom P, Weisberg D. Childhood origins of adult resistance to science. *Science*. 2007; 316:996–7. <https://doi.org/10.1126/science.1133398>.
- Brasseur A. The dangers of creationism in education. (11375). Luxembourg: Committee on Culture, Science and Education. 2007. <https://assembly.coe.int/Documents/Working-Docs/2007/EDOC11375.pdf>.
- Brennecke JS. Schülervorstellungen zur evolutionären Anpassung: qualitative Studien als Grundlage für ein fachdidaktisches Entwicklungskonzept in einem botanischen Garten [Universitätsbibliothek]. Gießen. 2015. <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2015/11320>
- Catholic Church in Germany. Zahlen und Fakten 2021/22 [Numbers and facts 2019/20]. 2020. https://www.dbk.de/fileadmin/redaktion/Zahlen%20und%20Fakten/Kirche%20Statistik/Allgemein_-_Zahlen_und_Fakten/AH332_BRO_ZuF_2021-2022_WEB.pdf
- Clement P. Creationism, science and religion: a survey of teachers' conceptions in 30 countries. *Procedia Soc Behav Sci*. 2015a; 167:279–87. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.675>.
- Clement P. Muslim teachers' conceptions of evolution in several countries. *Public Underst Sci*. 2015b;24(4):400–21. <https://doi.org/10.1177/0963662513494549>.
- Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2nd ed. Cambridge: Academic Press; 1988.

- Council of Europe. *The dangers of creationism in education*. (Doc. 11375). Committee on Culture, Science and Education. 2007. <https://assembly.coe.int/Documents/Working-Docs/2007/EDOC11375.pdf>
- Deniz H, Donnelly LA, Yilmaz I. Exploring the factors related to acceptance of evolutionary theory among Turkish preservice biology teachers: toward a more informative conceptual ecology for biological evolution. *J Res Sci Teach*. 2008;45(4):420–43. <https://doi.org/10.1002/tea.20223>.
- Department for Education (England). The national curriculum in England—Key stages 3 and 4 framework document. 2014. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/840002/Secondary_national_curriculum_corrected_PDF.pdf
- Directorate General Press and Communication. Europeans, Science and Technology (Special Eurobarometer, Issue). 2005.
- Döring N, Bortz J, Poeschl-Guenther S. *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* [research methods and evaluation in the social and human sciences]. Springer; 2016.
- Dunk RDP, Petto AJ, Wiles JR, Campbell BC. A multifactorial analysis of acceptance of evolution. *Evol Educ Outreach*. 2017. <https://doi.org/10.1186/s12052-017-0068-0>.
- Dunk RDP, Barnes ME, Reiss MJ, Alters B, Asghar A, Carter BE, Cotner S, Glaze AL, Hawley PH, Jensen JL, Mead LS, Nadelson LS, Nelson CE, Pobiner B, Scott EC, Shtulman A, Sinatra GM, Southerland SA, Walter EM, Wiles JR. Evolution education is a complex landscape. *Nat Ecol Evol*. 2019;3(3):327–9. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0802-9>.
- Ecklund EH, Scheitle CP. Religion among academic scientists: distinctions, disciplines, and demographics. *Soc Probl*. 2014;54(2):289–307. <https://doi.org/10.1525/sp.2007.54.2.289>.
- Elsdon-Baker F. Creating creationists: the influence of ‘issues framing’ on our understanding of public perceptions of clash narratives between evolutionary science and belief. *Public Underst Sci*. 2015;24(4):422–39. <https://doi.org/10.1177/0963662514563015>.
- European Commission, D.-G. f. C. *European citizens’ knowledge and attitudes towards science and technology* (Special Eurobarometer 516—April–May 2021, Issue. 2021.
- Eurydice. National specificities of the education system. 2021. https://eacea.ec.europa.eu/national-policies/eurydice/content/germany_en.
- Evangelical Church in Germany. Evangelical Church in Germany. Evangelical Church in Germany. 2016. https://www.ekd.de/ekd_en/ds_doc/facts_and_figures_2016.pdf.
- Evangelical Church in Germany. *Gezählt 2021. Zahlen und Fakten zum kirchlichen Leben* [Counted 2021. Numbers and facts on church life]. 2021. https://www.ekd.de/ekd_de/ds_doc/Gezaehlt_zahlen_und_fakten_2021.pdf.
- Evans EM. Cognitive and contextual factors in the emergence of diverse belief systems: creation versus evolution. *Cogn Psychol*. 2001;42(3):217–66. <https://doi.org/10.1006/cogp.2001.0749>.
- Everhart D, Hameed S. Muslims and evolution: a study of Pakistani physicians in the United States. *Evol Educ Outreach*. 2013. <https://doi.org/10.1186/1936-6434-6-2>.

- Federal Ministry of the Interior Building and Community. 2019 Migration Report Key Results. 2019. https://www.bamf.de/SharedDocs/Anlagen/EN/Forschung/Migrationsberichte/migrationsbericht-2019-zentraleergebnisse.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Federal Office for Migration and Refugees & German Islam Conference. Executive summary of the study “Muslim Life in Germany 2020”. 2020. https://www.bamf.de/SharedDocs/Anlagen/EN/Forschung/Forschungsberichte/Kurzberichte/fb38-muslimisches-leben-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=14.
- Federal Ministry of the Interior and Home Affairs. Christliche Kirchen [Christian Churches]. 2022. <https://www.bmi.bund.de/DE/themen/heimat-integration/gesellschaftlicher-zusammenhalt/staat-und-religion/christlichekirchen/christliche-kirchen-node.html>. Accessed 08 09 2022.
- Federer MR, Nehm RH, Opfer JE, Pearl D. Using a constructed-response instrument to explore the effects of item position and item features on the assessment of students’ written scientific explanations. *Res Sci Educ*. 2015;45(4):527–53. <https://doi.org/10.1007/s11165-014-9435-9>.
- Fenner A. Schülervorstellungen zur Evolutionstheorie: Konzeption und Evaluation von Unterricht zur Anpassung durch Selektion [Student conceptions of evolutionary theory: designing and evaluating lessons on adaptation by selection] Universitätsbibliothek]. Giesen. 2013. <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2013/9250>.
- Field A. Discovering statistics using IBM SPSS statistics. 5th ed. California: Sage; 2018.
- Fowler JW, Dell ML. Stages of faith from infancy through adolescence reflections on three decades of faith development theory. In: Roehlkepartain EC, King PE, Wagener L, Benson PL, editors. The handbook of spiritual development in childhood and adolescence. California: Sage Publications, Inc; 2006. p. 34–5. <https://doi.org/10.4135/9781412976657.n3>.
- German National Academy of Sciences Leopoldina. Teaching evolutionary biology at schools and universities. Halle (Saale): Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. Nationale Akademie der Wissenschaften. 2017. https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2017_Stellungnahme_Evolution_ENG.pdf
- Glaze AL, Goldston MJ. U.S. Science teaching and learning of evolution: a critical review of the literature 2000–2014. *Sci Educ*. 2015; 99(3):500–18. <https://doi.org/10.1002/sce.21158>.
- Gould SJ. Rocks of ages. Science and religion in the fullness of life. *Libr Contemp Thought*. 1999; 400:830.
- Großschedl J, Konnemann C, Basel N. Pre-service biology teachers’ acceptance of evolutionary theory and their preference for its teaching. *Evol Educ Outreach*. 2014;7(1):18. <https://doi.org/10.1186/s12052-014-0018-z>.
- Großschedl J, Seredszus F, Harms U. Angehende Biologielehrkräfte: evolutionsbezogenes Wissen und Akzeptanz der Evolutionstheorie [pre-service biology teachers: evolution-related knowledge and acceptance of evolutionary theory]. *Zeitschrift Für Didaktik Der Naturwissenschaften*. 2018;24(1):51–70. <https://doi.org/10.1007/s40573-018-0072-0>.
- Ha M, Haury DL, Nehm RH. Feeling of certainty: uncovering a missing link between knowledge and acceptance of evolution. *J Res Sci Teach*. 2012;49(1):95–121. <https://doi.org/10.1002/tea.20449>.

- Heddy BC, Sinatra GM. Transforming misconceptions: Using transformative experience to promote positive affect and conceptual change in students learning about biological evolution. *Sci Educ*. 2013;97(5):723–44. <https://doi.org/10.1002/sce.21072>.
- Kahan D. Misconceptions, misinformation, and the logic of identity-protective cognition. *SSRN Electron J*. 2017. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2973067>.
- Kelemen D. Teleological minds: How natural intuitions about agency and purpose influence learning about evolution. In: Rosengren K, Brem SK, Evans EM, Sinatra GM, editors. *Evolution challenges: integrating research and practice in teaching and learning about evolution*. 1st ed. Oxford: Oxford University Press; 2011.
- Konnemann C, Asshoff R, Hammann M. Einstellungen zur Evolutionstheorie: theoretische und messtheoretische Klärungen [attitudes toward evolutionary theory: theoretical and measurement-theoretical clarifications]. *Zeitschrift Für Didaktik Der Naturwissenschaften*. 2012; 18:55–79.
- Kuschmierz P, Beniermann A, Graf D. Development and evaluation of the knowledge about evolution 2.0 instrument (KAEVO 2.0). *Int J Sci Educ*. 2020a;42(15):2601–29. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1822561>.
- Kuschmierz P, Meneganzin A, Pinxten R, Pievani T, Cvetković D, Mavrikaki E, Graf D, Beniermann A. Towards common ground in measuring acceptance of evolution and knowledge about evolution across Europe: a systematic review of the state of research. *Evol Educ Outreach*. 2020b;13(1):18. <https://doi.org/10.1186/s12052-020-00132-w>.
- Kuschmierz P, Beniermann A, Bergmann A, Pinxten R, Aivelo T, Berniak-Woźny J, Bohlin G, Bugallo-Rodriguez A, Cardia P, Cavadas BF, Pinto B, Cebesoy UB, Cvetković DD, Demarsy E, Đorđević MS, Drobniak SM, Dubchak L, Dvořáková RM, Fančovičová J, Graf D. European first-year university students accept evolution but lack substantial knowledge about it: a standardized European cross-country assessment. *Evol Educ Outreach*. 2021; 14(1):17. <https://doi.org/10.1186/s12052-021-00158-8>.
- Lammert N. Akzeptanz, Vorstellungen und Wissen von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I zu Evolution und Wissenschaft [lower secondary school students' acceptance, perceptions, and knowledge of evolution and science]. Technische Universität Dortmund. 2012. <https://doi.org/10.17877/DE290R-4832>.
- Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. 1977;33(1):159–74. <https://doi.org/10.2307/2529310>.
- Martin JW. Compatibility of major U.S. Christian denominations with evolution. *Evol Educ Outreach*. 2010;3(3):420–31. <https://doi.org/10.1007/s12052-010-0221-5>.
- Miller J, Scott E, Okamoto S. Public acceptance of evolution. *Science*. 2006; 313:765–6. <https://doi.org/10.1126/science.1126746>.
- Miller JD, Scott EC, Ackerman MS, Laspra B, Branch G, Polino C, Huffaker JS. Public acceptance of evolution in the United States, 1985–2020. *Public Underst Sci*. 2022; 31(2):223–38. <https://doi.org/10.1177/09636625211035919>.
- Ministry for School and Education of North Rhine-Westphalia. Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen: Biologie. [Core curriculum for secondary level II gymnasium/comprehensive school in North Rhine-Westphalia: Biology] Düsseldorf. 2013. https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/bi/GOST_Biologie_Endfassung.pdf

- Ministry of the Interior of the State of North Rhine-Westphalia. Schulgesetz für das Land Nordrhein-Westfalen (Schulgesetz NRW—SchulG). [School law for the state of North Rhine-Westphalia] North Rhine-Westphalia. 2022. <https://bass.schul-welt.de/pdf/6043.pdf?20220912183404>.
- National Commission for the Protection of Human Subjects of Biomedical and Behavioral Research. The Belmont Report: ethical principles and guidelines for the protection of human subjects of research. 1979. <https://www.hhs.gov/ohrp/regulations-and-policy/belmont-report/read-thebelmont-report/index.html>.
- Nehm RH, Ha M. Item feature effects in evolution assessment. *J Res Sci Teach.* 2011; 48(3):237–56. <https://doi.org/10.1002/tea.20400>.
- Nehm RH, Reilly L. Biology majors' knowledge and misconceptions of natural selection. *Bio-science.* 2007;57(3):263–72. <https://doi.org/10.1641/b570311>.
- Nehm RH, Beggrow EP, Opfer JE, Ha M. Reasoning about natural selection: diagnosing contextual competency using the ACORNS instrument. *Am Biol Teach.* 2012; 74(2):92–8. <https://doi.org/10.1525/abt.2012.74.2.6>.
- Nehm RH, Ha M, Rector M, Opfer JE, Perrin L, Ridgway J, Mollohan K. Scoring guide for the open response instrument (ORI) and evolutionary gain and loss test (EGALT). 2010. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.471.7384&rep=rep1&type=pdf>
- Nehm RH, Ha M, Großschedl J, Harms U, Roshayanti F. (2013, April 6–April 9). American, German, Korean, and Indonesian pre-service teachers' evolutionary acceptance, knowledge, and reasoning patterns. Paper in the proceedings of the National Association for Research in Science Teaching (NARST) conference, Rio Grande, Puerto Rico.
- O'Connor C, Joffe H. Intercoder reliability in qualitative research: debates and practical guidelines. *Int J Qual Methods.* 2020; 19:1609406919899220. <https://doi.org/10.1177/1609406919899220>.
- Ohly K-P. Evolutionstheorie und Schöpfungslehre im Biologieunterricht [theory of evolution and creation in biology classes]. In: Dreesmann DC, Graf D, Witte K, editors. *Evolutionbiologie: moderne Themen für den Unterricht*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag; 2012. p. 485–503. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2786-1_17.
- Opfer JE, Nehm RH, Ha M. Cognitive foundations for science assessment design: knowing what students know about evolution. *J Res Sci Teach.* 2012; 49(6):744–77. <https://doi.org/10.1002/tea.21028>.
- Park HJ. Components of conceptual ecologies. *Res Sci Educ.* 2007; 37(2):217–37. <https://doi.org/10.1007/s11165-006-9023-8>.
- Pew Research Center. Religious Landscape Study. 2007. <https://www.pewresearch.org/religion/religious-landscape-study/>. Accessed 02 04 2022.
- Pickel G. *Religionsmonitor verstehen was verbindet. Religiosität im internationalen Vergleich* [Religion Monitor Understanding what connects. Religiosity in International Comparison]. 2013. https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/GP_Religionsmonitor_verstehen_was_verbindet_Religiositaet_im_internationalen_Vergleich.pdf

- Posner GJ, Strike KA. A revisionist theory of conceptual change. *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice*. 1992; 147
- Rachmatullah A, Nehm RH, Roshayanti F, Ha M. Evolution education in Indonesia: pre-service biology teachers' knowledge, reasoning models, and acceptance of evolution. In: Deniz H, Borgerding LA, editors. *Evolution education around the globe*. Cham: Springer International Publishing AG; 2018. p. 335–55. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90939-4_18.
- Rios K, Cheng ZH, Totton RR, Shariff AF. Negative stereotypes cause Christians to underperform in and disidentify with science. *Soc Psychol Pers Sci*. 2015;6(8):959–67. <https://doi.org/10.1177/1948550615598378>.
- Schneider V. Wirkungen des Protestantismus auf Einstellungen und Wertorientierungen. USA und Deutschland im Vergleich [effects of Protestantism on attitudes and value orientations. USA and Germany in comparison]. 1st ed. Wiesbaden: Springer VS; 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30654-0>.
- Sinatra GM, Southerland SA, McConaughy F, Demastes JW. Intentions and beliefs in students' understanding and acceptance of biological evolution. *J Res Sci Teach*. 2003; 40(5):510–28. <https://doi.org/10.1002/tea.10087>.
- Sinatra GM, Brem SK, Evans EM. Changing minds? Implications of conceptual change for teaching and learning about biological evolution. *Evol Educ Outreach*. 2008;1(2):189–95. <https://doi.org/10.1007/s12052-008-0037-8>.
- Smith MU. Current status of research in teaching and learning evolution: II pedagogical issues. *Sci Educ*. 2010; 19(6):539–71. <https://doi.org/10.1007/s11191-009-9216-4>.
- Smith MU, Siegel H. On the relationship between belief and acceptance of evolution as goals of evolution education. *Sci Educ*. 2016;25(5):473–96. <https://doi.org/10.1007/s11191-016-9836-4>.
- Southerland SA, Sinatra GM. The shifting roles of acceptance and dispositions in understanding biological evolution. In: Cobern WW, Tobin K, Brown-Acquay H, Espinet M, Irzik G, Jegede O, Herrera LR, Rollnick M, Sjöberg S, Tuan H-I, Alsop S, editors. *Beyond Cartesian dualism: encountering affect in the teaching and learning of science*. Berlin: Springer; 2005.
- Strike KA, Posner GJ. Conceptual change and science teaching. *Eur J Sci Educ*. 1982; 4(3):231–40. <https://doi.org/10.1080/0140528820040302>.
- Tibell LAE, Harms U. Biological principles and threshold concepts for understanding natural selection. *Sci Educ*. 2017;26(7):953–73. <https://doi.org/10.1007/s11191-017-9935-x>.
- Truong JM, Barnes ME, Brownell SE. Can six minutes of culturally competent evolution education reduce students' level of perceived conflict between evolution and religion? *Am Biol Teach*. 2018;80(2):106–15. <https://doi.org/10.1525/abt.2018.80.2.106>.
- Unsworth A, Voas D. Attitudes to evolution among Christians, Muslims and the non-religious in Britain: differential effects of religious and educational factors. *Public Underst Sci*. 2018; 27(1):76–93. <https://doi.org/10.1177/0963662517735430>.
- Unsworth A, Voas D. The Dawkins effect? Celebrity scientists, (non)religious publics and changed attitudes to evolution. *Public Underst Sci*. 2021; 30(4):434–54. <https://doi.org/10.1177/0963662521989513>.

Waschke T, Lammers C. Evolutionstheorie im Biologieunterricht—(k)ein Thema wie jedes andere? [evolutionary theory in biology classes—(not) a topic like any other?]. In: Dreesmann DC, Graf D, Witte K, editors. *Evolutionsbiologie: moderne Themen für den Unterricht*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag; 2012. p. 505–34. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2786-1_18.

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

5.2 Effectiveness and use of optional scaffolds: an intervention study in biology lessons on phylogenetic trees (Studie II)

Die folgenden Darstellungen zu Studie II beziehen sich auf das Originalmanuskript:

Gutowski, R., Großmann, N., & Großschedl, J. (2025). Effectiveness and use of optional scaffolds: an intervention study in biology lessons on phylogenetic trees. *International Journal of Science Education*. 1 – 23. <https://doi.org/10.1080/09500693.2025.2574522>.

Zu dem Originalmanuskript gehört ein Anhang mit ergänzenden Analyseergebnissen (z. B. zur Ermittlung potenzieller Unterschiede in den Ausgangswerten der drei Interventionsgruppen), der unter <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.30524499> abgerufen werden kann.

Die Daten, die dieser Studie zugrunde liegen, sind auf dem Datenserver des Open Science Framework gespeichert und können unter folgendem Link abgerufen werden: <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/YN2BZ>.

5.2.1 Vorstellung der Studie

Das Fach Biologie stellt Lernende vor vielfältige Herausforderungen. Diese Herausforderungen können ihren Ursprung in den vermittelten fachlich adäquaten Konzepten haben, beispielsweise wenn fachlich inadäquate Konzepte diesen entgegenstehen (z. B. Gregory, 2009; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020). Darüber hinaus werden biologische Sachverhalte häufig durch diskontinuierliche Texte wie Tabellen oder Diagramme visualisiert (Novick & Catley, 2014). Beim Lernen über Evolution kommt zudem eine weitere Darstellungsweise zum Einsatz, die für viele Lernende ungewohnt ist: Die Darstellung evolutionärer Verwandtschaftsverhältnisse in Form von phylogenetischen Stammbäumen. Insbesondere für das Verständnis von makroevolutionären Entwicklungen sind phylogenetische Stammbäume grundlegend (siehe Kapitel 2.1; Catley & Novick, 2009; Gregory, 2008). Aufgrund ihrer besonderen Struktur kann der Zugang zum abgebildeten Lerninhalt für Lernende jedoch erschwert sein, was in der Folge zu Fehlinterpretationen von dargestellten Zusammenhängen führen kann und weshalb das Lesen von phylogenetischen Stammbäumen erst erlernt werden muss (Gregory, 2008; Jenkins et al., 2022; O'Hara, 1997; Schramm & Schmiemann, 2019).

Der Zugang zu komplexen Lerninhalten wie phylogenetische Stammbäume kann für Lernende durch die Gestaltung des Lernmaterials erleichtert werden. Bei der Gestaltung des Lernmaterials können sowohl inhaltliche (z. B. die Wahl des Kontextes; Novick & Catley, 2013, 2014) als auch methodische (z. B. der Einsatz von Instruktionsstrategien; Neubrand et al., 2016; Reiss & Renkl, 2002) Entscheidungen einfließen. Hierbei sollte die Balance von Über- bzw.

Unterforderung beachtet werden, da sonst ein Lernfortschritt verhindert wird (Vygotsky, 1978). Da sich Lernende in ihrer Entwicklung unterscheiden können, ist das notwendige Ausmaß an Unterstützungsmaßnahmen zwischen den Lernenden individuell verschieden (zur Entwicklung in der Zone der nächsten Entwicklung siehe Kapitel 1, Vygotsky, 1978). Eine Möglichkeit alle Lernenden einer Lerngruppe entsprechend ihrer Bedürfnisse zu fördern, stellen gestufte Lernhilfen dar. Sie werden zusätzlich zu dem eigentlichen Lernmaterial (z. B. in Form von Hilfekarten) bereitgestellt und von den Lernenden individuell bei Bedarf genutzt (Hänze et al., 2010; Hänze et al., 2007). Durch die individuelle Nutzung kann eine Überforderung aufgrund mangelnder Unterstützung sowie eine Unterforderung aufgrund zu kleinschrittiger Erläuterungen vermieden und die kognitive Belastung bei den Lernenden reduziert werden (Arnold et al., 2017; Franke-Braun et al., 2008; Hänze et al., 2010).

Gestufte Lernhilfen ermöglichen es Lehrenden somit Lernende mit dem gleichen Material differenziert zu unterstützen. Aufgrund ihrer mehrstufigen Struktur können sie in der Erstellung jedoch aufwendig sein. Um Hinweise auf eine zeitökonomische und unterrichtspraktische Alternative für Lehrkräfte zu finden, werden in dieser Studie drei Varianten der gestuften Lernhilfen (vollständige gestufte Lernhilfen, gestufte Prompts, gestufte Lösungsbeispiele) hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Lernerfolg (Wissen über phylogenetische Stammbäume im Posttest) und motivationale Faktoren (Selbstwirksamkeitserwartungen und intrinsische Motivation) verglichen. Dazu wird folgende Frage untersucht:

1. *Unterscheiden sich Lernende in ihrem Lernerfolg, ihrer Entwicklung von themenbezogenen Selbstwirksamkeitserwartungen sowie ihrer intrinsischen Motivation während der Intervention, wenn sie durch verschiedene Instruktionsstrategien mit optionalen Lernhilfen unterstützt werden?*

Da gestufte Lernhilfen optional sind, entscheidet nicht die Lehrperson über den Grad der Unterstützung, sondern die Lernenden bestimmen diesen während des Lernprozesses selbst (Arnold et al., 2017; Schmidt-Weigand et al., 2009). Der bisherige Forschungsstand im Bereich der Biologiedidaktik untersucht jedoch vermehrt die Auswirkung von gestuften Lernhilfen auf die Lernenden und weniger das Zusammenspiel mit den individuellen Lernvoraussetzungen. Die Studie greift daher diese Forschungslücke auf und untersucht die potenzielle Bedeutung personenbezogener Variablen bei der Nutzung optionaler Lernhilfen.

Hinsichtlich der Wirkung von gestuften Lernhilfen gibt es Hinweise darauf, dass vor allem Lernende mit geringer ausgeprägtem Wissen von diesen profitieren können (Großmann &

Wilde, 2019). Gleichzeitig tendieren Lernende mit hohen Selbstwirksamkeitserwartungen eher dazu sich intensiver mit herausfordernden Aufgaben auseinanderzusetzen (Bandura, 1978; Pratsala & Redford, 2010) und Lernende mit höheren motivationalen Orientierungen sind eher dazu geneigt, sich Hilfe zu suchen (Martín-Arbós et al., 2021; Newman, 1990). Die Frage, ob Lernende mit geringerem Vorwissen eher optionale Lernhilfen in Form von gestuften Lernhilfen (beziehungsweise gestuften Prompts oder Lösungsbeispielen) nutzen und ob dies auch vermehrt auf Personen mit hohen Selbstwirksamkeitserwartungen und hoher intrinsischer Motivation zutrifft, ist in der Forschung noch unbeantwortet. Vor diesem Hintergrund soll mit dieser Studie zusätzlich aufgeklärt werden, welche kognitiv-motivationalen personenbezogenen Variablen (Vorwissen, Selbstwirksamkeitserwartungen und intrinsische Motivation) Lernende, die optionale Lernhilfen nutzen, im Vergleich zu Lernenden, die diese nicht nutzen, aufweisen. Zudem wird explorativ erhoben, welche Gründe für den Entscheidungsprozess zur (Nicht-)Nutzung der optionalen Lernhilfen von Lernenden als relevant bewertet werden.

2. *Unterscheiden sich Lernende, die optionale Lernhilfen nutzen, in ihren Lernvoraussetzungen (Vorwissen, anfängliche themenbezogene Selbstwirksamkeitserwartungen, biologiebezogene Selbstwirksamkeitserwartungen und intrinsischen Motivation im Biologieunterricht) von Lernenden, die diese nicht nutzen?*
3. *Unterscheiden sich Lernende, die optionale Lernhilfen nutzen, in ihrem Lernerfolg, ihrer Entwicklung von themenbezogenen Selbstwirksamkeitserwartungen sowie ihrer intrinsischen Motivation während der Intervention von Lernenden, die diese nicht nutzen?*
4. *Welche Gründe für die (Nicht-)Nutzung optionaler Lernhilfen werden von den Lernenden als relevant bewertet?*

Im Rahmen dieser experimentellen Interventionsstudie wurden insgesamt $N = 133$ Schüler:innen in der Qualifikationsphase der Sekundarstufe II befragt von denen $n = 108$ Schüler:innen an allen drei Testzeitpunkten teilnahmen. Im Prätest wurden das Vorwissen über phylogenetische Stammbäume und die damit verbundenen Selbstwirksamkeitserwartungen sowie biologiebezogene Selbstwirksamkeitserwartungen und die intrinsische Motivation im Biologieunterricht erhoben (siehe Abbildung 1). Zudem wurden demographische Daten für Gruppenabgleich zur Vermeidung von Unterschieden in den Ausgangswerten erhoben. Die Intervention zum Thema phylogenetische Stammbäume wurde in der darauffolgenden Unterrichtsstunde durchgeführt und dauerte 90 Minuten. Die Schüler:innen wurden randomisiert den drei Gruppen (1) vollständige gestufte Lernhilfen, (2) gestufte Prompts und (3) gestufte Lösungsbeispiele

zugeordnet. In Einzelarbeit bearbeiteten die Schüler:innen das gleiche Material und konnten die in Briefumschlägen am Sitzplatz bereitgelegten optionalen Lernhilfen bei Bedarf nutzen. Am Ende der Intervention bewerteten sie zudem die Relevanz möglicher Gründe für die (Nicht-)Nutzung der optionalen Lernhilfen mittels einer vierstufigen Rating-Skala. Im Posttest wurde das Wissen über phylogenetische Stammbäume nach der Intervention erhoben, um so den Lernerfolg zu ermitteln. Zudem wurde erneut die Selbstwirksamkeitserwartungen bezüglich phylogenetischer Stammbäume sowie die intrinsische Motivation während der Intervention abgefragt.

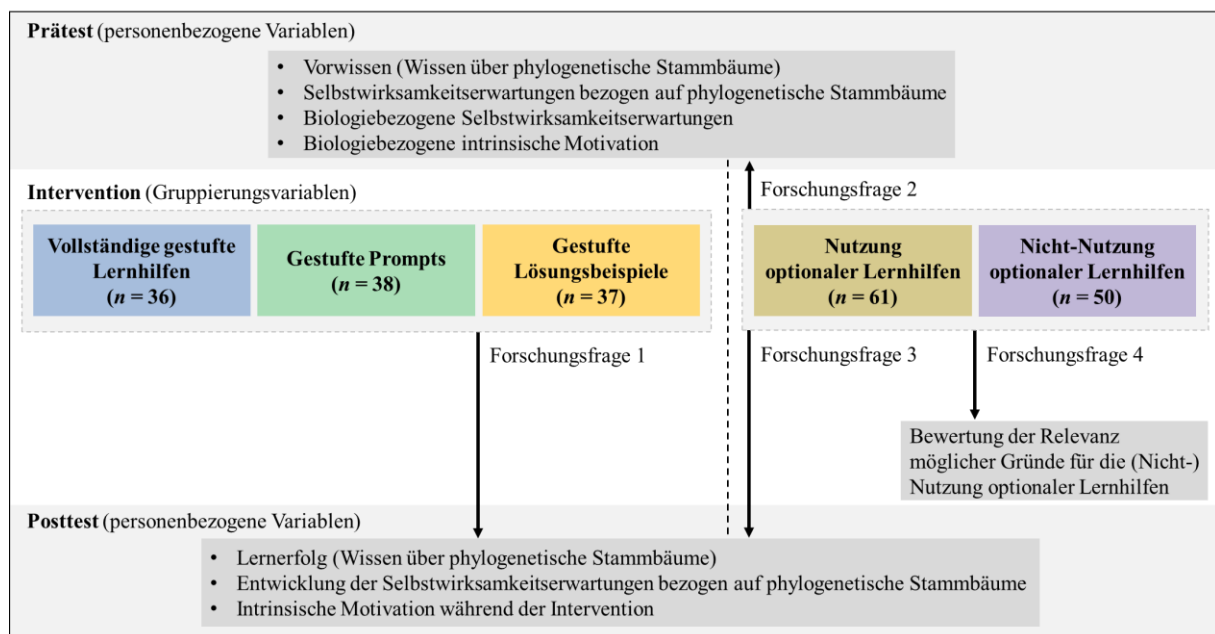


Abbildung 1. Übersicht über das Studiendesign und Einordnung der Forschungsfragen in den Studienzusammenhang (eigene Darstellung).

5.2.2 Eigenanteile

Die zweite Studie der Dissertation wurde von Roxanne Gutowski konzipiert und durchgeführt. Sie wurde dabei von Dr. Nadine Großmann beraten. Die Dateneingabe und -analyse, das Verfassen und Einreichen des Manuskripts sowie die Erstellung von Visualisierungen wurde ebenfalls von Roxanne Gutowski ausgeführt. Bei der Überarbeitung des Manuskripts wurde Roxanne Gutowski durch Dr. Nadine Großmann und Prof. Dr. Jörg Großschedl unterstützt. Die Betreuung übernahm Prof. Dr. Jörg Großschedl.

5.2.3 Originalmanuskript zu Studie II

Effectiveness and use of optional scaffolds: an intervention study in biology lessons on phylogenetic trees

Roxanne Gutowski, Nadine Großmann, Jörg Großschedl

Abstract

In heterogeneous classes, students require different levels of support to effectively learn complex content such as interpreting phylogenetic trees. Incremental scaffolds are a promising approach that considers students' knowledge and skills and offers individual ways of working on tasks. These scaffolds consist of an initial prompt followed by a worked-out example. Current research on the effectiveness of incremental scaffolds for cognitive (knowledge) and motivational (self-efficacy expectations, intrinsic motivation) outcomes is inconsistent. This study explored the effects of incremental scaffolds (treatment 1) and their key components, prompts (treatment 2) and worked-out examples (treatment 3), when offered as voluntary, optional support. The comparison of the three treatments ($N = 108$ upper secondary school students; grade 11 and 12) showed no significant differences regarding students' cognitive and motivational outcomes. Subsequent analyses revealed that optional support was mainly used by students with lower pre-knowledge, lower-self-efficacy expectations, and lower intrinsic motivation. Simultaneously, students who used support scored lower on post-knowledge assessments and on a specific indicator of intrinsic motivation (interest/enjoyment). Our findings suggest that students who need support are the ones who use it. However, using support alone does not appear sufficient to compensate for differences compared to students who do not require support.

Keywords: scaffolding; learning outcomes; motivation

Introduction

In biology class, students face challenging contexts that require a range of competencies. Evolution represents an overarching explanatory principle that can be applied to various biological processes (German National Academy of Sciences Leopoldina, 2017). Biology education research has long argued in favour of considering evolutionary processes of macroevolution, as these are an important and often neglected component in learning about evolution (Catley, 2006; Smith, 2010). Understanding macroevolutionary processes, such as the development of homologous structures in related taxa, can be quite demanding as it requires an understanding

of deep time (Catley & Novick, 2009). Phylogenetic trees are a useful instrument for visualising such evolutionary processes and associated taxonomic relationships (Catley & Novick, 2009; Gregory, 2008). The peculiar way in which information is presented in phylogenetic trees can lead to misinterpretation of the structures when determining such relationships (e.g., Blacquiere & Hoese, 2016; Schramm & Schmiemann, 2019) and therefore needs to be taught in biology class (O'Hara, 1997).

Educators should provide appropriate learning materials that address the diverse needs of learners to solve such challenging tasks. One promising approach is the use of incremental scaffolds, which enhance accessibility by providing optional support that students can engage with as needed (Schmidt-Weigand et al., 2008; Schmidt-Weigand et al., 2009). Incremental scaffolds are designed to guide students through complex tasks by anticipating common learning barriers – such as linguistic difficulties or content-related misconceptions – and offering structured assistance through prompts and worked-out examples (Schmidt-Weigand et al., 2008; Schmidt-Weigand et al., 2009). Although developing such scaffolds requires substantial preparation time, teachers can support a broader range of students with one adaptable resource, potentially reducing the need for individual assistance (e.g., Schmidt-Borcherding et al., 2013; Schmidt-Weigand et al., 2009).

Despite the potential of incremental scaffolds, the research on their effectiveness compared to more traditional approaches, such as fully worked-out examples, is quite heterogeneous – for instance, findings indicate no differences in their effectiveness (Großmann & Wilde, 2019) or show that these scaffolds are less effective compared to other approaches (Schmidt-Borcherding et al., 2013). Therefore, we want to examine whether focusing on a single scaffold component (either incremental prompts or incremental worked-out examples) can achieve comparable learning outcomes as the comprehensive incremental scaffolds.

Theoretical background

Incremental scaffolds as an instructional strategy

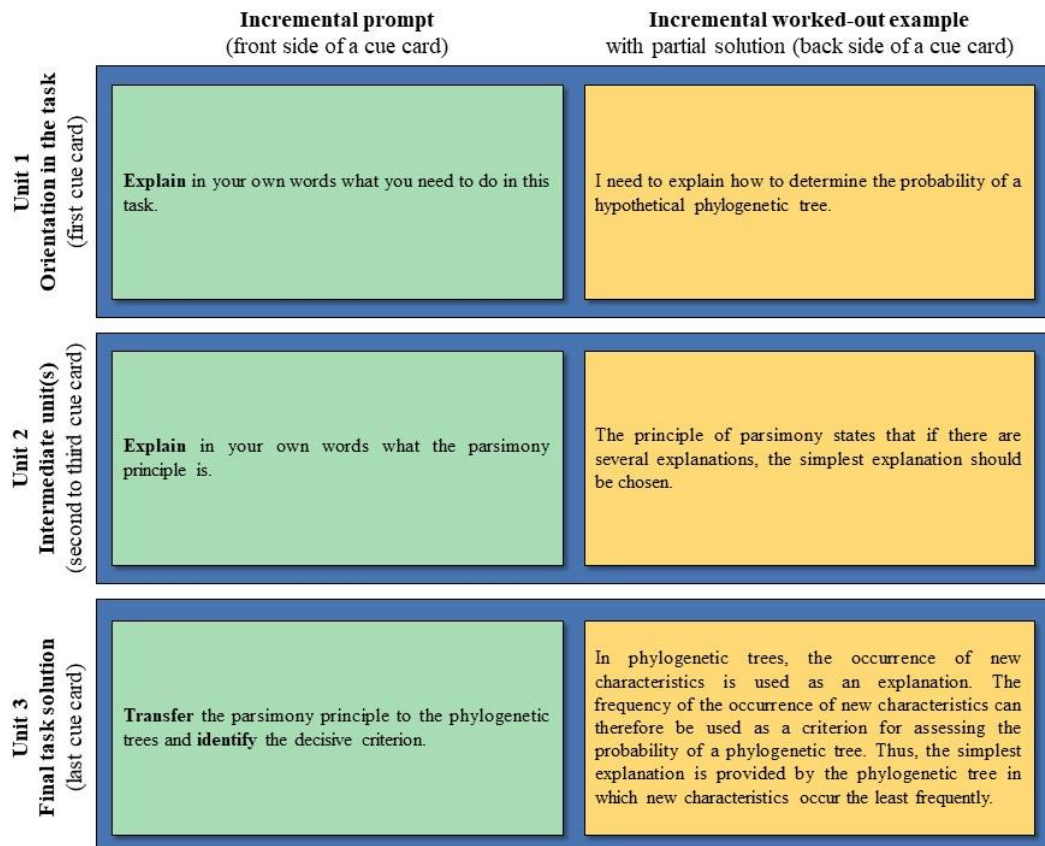
Primarily grounded in Vygotsky's (1978) socio-cultural theory, scaffolding is an instructional strategy where a more knowledgeable individual provides temporary support to learners as they acquire new skills or knowledge. It gradually reduces this support as the learner's skills and knowledge grow (Gonulal & Loewen, 2018; van de Pol et al., 2019). Vygotsky (1978) suggests that learning occurs within a zone of proximal development, which represents the gap between a learner's current level of development and the potential level the learner can reach with such

support. For scaffolding to be effective, tasks must be adequately challenging, and the support must be adapted to the learner's current understanding, as learning within the zone of proximal development is impossible if the task remains too difficult or becomes too easy when using the scaffold (Vygotsky, 1978). A method to ensure that scaffolds are appropriate is the contingent strategy, meaning that support is gradually reduced as the student succeeds and increased when mistakes occur (van de Pol & Elbers, 2013; Wood et al., 1978). Incremental scaffolds are a specific form of scaffolding in which it is not the teacher but the learner who determines whether support is necessary (Schmidt-Weigand et al., 2009).

Incremental scaffolds represent a refinement of the worked-out example method, developed to offer adaptive support (Schmidt-Weigand et al., 2009). They provide varying levels of support, breaking down complex tasks into more manageable units (e.g., embodied by cue cards), and fostering the learner's independent task-solving process. Each unit is divided into two parts: The first part offers a prompt, such as a content-related cue to activate prior knowledge or a strategic cue (e.g., to structure the learning process). The second part provides a responding worked-out example with a partial solution (e.g., Großmann & Wilde, 2019; Schmidt-Weigand et al., 2009). If the unit's support is insufficient for an individual learner, the next unit incrementally offers additional support. At the end of the step-by-step task solution, a full solution of the task is offered (e.g., Schmidt-Borcherding et al., 2013). Generally, the first unit of incremental scaffolds gives the learner orientation in the processing of the task, while the last unit represents the complete solution. Biological tasks are diverse and often require complex problem solving such as experimentation (Großmann & Wilde, 2019; Stiller & Wilde, 2023). A more theory-orientated complex task is determining the probability of phylogenetic trees. An example of a task-solving process to determine the probability of phylogenetic trees divided into units is shown in Figure 1.

Figure 1

Example of the unit structure of comprehensive incremental scaffolds.



Note. Three units of a comprehensive incremental scaffold (blue) were subdivided into incremental prompts (green), and incremental worked-out examples (yellow) were used in this study.

Findings on the efficacy of incremental scaffolds are quite heterogeneous when compared to other approaches like worked-out examples. For instance, intervention studies found no differences in knowledge acquisition compared to other approaches in general but revealed positive effects for less knowledgeable learners when compared to worked-out examples (Großmann & Wilde, 2019) or reported higher learning outcomes in conditions where learners received support through worked-out examples (Schmidt-Borcherding et al., 2013). Additionally, studies showed that in different learning settings (mathematical, Chen et al., 2023; educational, Glogger-Frey et al., 2015; Glogger-Frey et al., 2022) learners achieved higher learning outcomes (e.g., transfer of learning to new contexts) when learning with worked-out examples than learners solving the problem on their own.

Studies on the effectiveness of prompts in learning environments not directly related to biology learning revealed heterogeneous results as well. There is indication that various types of prompts, such as cognitive (Hübner et al., 2006; Zeitlhofer et al., 2023) or metacognitive (Guo, 2022;

Hübner et al., 2006) prompts, lead to better learning outcomes compared to learning without any prompts. However, other studies reported no significant differences in learning outcomes when either a combination of cognitive and metacognitive prompts (Gentner & Seufert, 2020) or solely metacognitive prompts (Zeithofer et al., 2023) were compared to an unsupported control group. There is also evidence that learners with low prior knowledge particularly benefit from support through instructional strategies like prompts or worked-examples, whereas learners with high prior knowledge often benefit less or may even be hindered (Einsiedler & Hardy, 2010; Kalyuga, 2007; Paas et al., 2003; Roelle & Berthold, 2013). This pattern is known as the expertise reversal effect, which describes how learners with lower levels of knowledge benefit from instructional strategies that can increase germane cognitive load, whereas advanced learners may experience redundancies with existing knowledge (Kalyuga, 2007). Such redundancies can increase extraneous load and thereby consume cognitive resources needed for further learning (Kalyuga, 2007; Kalyuga et al., 2003). Incremental scaffolds can be used to mitigate cognitive load by allowing students to control the degree of support they receive and thus manage the gradual reduction of scaffolding (Arnold et al., 2017). As a result of the heterogeneous state of research regarding the effectiveness of incremental scaffolds, prompting, and worked-out examples, it remains an open question whether learners need a full incremental scaffold or whether incremental prompting or worked-out examples are sufficient to support learning. Therefore, this study investigates which type of scaffolding (incremental scaffolds, incremental prompts, and incremental worked-out examples) is most effective. This includes exploring their impact on cognitive and motivational outcomes as well as possible reasons in the decision-making process regarding the (non-)use of these three types of optional support. The following sections outline the theoretical framework that underlies the analysis of these variables in question.

Incremental scaffolds and motivational variables

Besides examining cognitive outcomes, prior studies investigated the effectiveness of incremental scaffolds regarding learners' motivation. Motivation can be described as extrinsic and intrinsic (Ryan & Deci, 2020). Extrinsically motivated behaviour is aimed at achieving or avoiding a particular (social) outcome, such as a good grade or a punishment, whereas intrinsic motivation comes from enjoying the activity itself (e.g., Ryan & Deci, 2020). Previous research suggests that learners' motivation has an impact on their (meta-)cognitive and learning engagement, which in turn are related to the use and the effectiveness of scaffolding (Acosta-Gonzaga & Ramirez-Arellano, 2022). When learning with incremental scaffolds, studies found both a

higher (Schmidt-Borcherding et al., 2013) and lower (Stiller & Wilde, 2023) level of motivation compared to structurally more guided learning settings. In a comparison of cognitive, metacognitive and no prompts, Zeitlhofer et al. (2023) found no significant differences in learners' intrinsic motivation.

Intrinsic motivation is also rooted in the satisfaction of the basic psychological needs for competence (the feeling of being able to master a task or situation) and autonomy (the feeling of being able to act in a self-determined way, e.g., through freedom of choice; Ryan & Deci, 2020). A sense of competence can be achieved by reducing uncertainty through structured tasks and transparent expectations, while a sense of autonomy is promoted through freedom of choice (Kaiser et al., 2020). Incremental scaffolds offer structured yet flexible support that balances both aspects: they allow learners to decide whether and to what extent they use the provided support (perception of autonomy) while helping them to solve challenging tasks through it (perception of competence; Großmann & Wilde, 2019; Hänze et al., 2010). Concerning the perception of competence, positive effects of incremental scaffolds compared to worked-out examples were found (Schmidt-Weigand et al., 2009), while the perception of autonomy did not differ (Schmidt-Borcherding et al., 2013; Schmidt-Weigand et al., 2009). However, Stiller and Wilde (2023) found that students' perceived competence is higher in full-structured settings than in environments with incremental scaffolds. This current state of research demonstrates inconsistencies and especially lacks the consideration of mere prompts in comparison to incremental scaffolds.

How individuals respond to challenges, including the level of invested effort or the time spent to solve a challenging task is affected by their self-efficacy expectations (Bandura, 1978). *Self-efficacy expectations* describe a person's belief in their capacity to successfully perform a required behaviour without considering the actual future outcome and potential deviation from that outcome (Bandura, 1978). Learners with high self-efficacy are more likely to approach tasks confidently, which can contribute to the development of intrinsic motivation by finding personal satisfaction in overcoming challenges (Prat-Sala & Redford, 2010).

Glogger-Frey et al. (2015) found for a physics task that learners learning with worked-out examples perceived higher self-efficacy than those solving the problem on their own. They suggest, increased self-efficacy to be one mediator for certain learning outcomes (here transfer of learning to new contexts; far transfer). However, in a more recent study, they did not find significant differences in self-efficacy between learning with or without worked-out examples (Glogger-Frey et al., 2022). Regarding prompting, previous research hints that prompting

increases learners' self-efficacy expectations when compared to learning without prompts (Gentner & Seufert, 2020). Still, the relationship between the use of incremental scaffolds (and their components) and learners' self-efficacy expectations has not yet been compared in previous analyses.

Incremental scaffolds and learners' reasons to use them

While working on complex tasks, learners have to recognise whether they need additional support during the learning process. The decision to use an instruction strategy like incremental scaffolds is a typical characteristic of self-regulated learning. Self-regulated learning is a constructivist approach where learners build up new cognitive structures in a self-directed process (e.g., Boekaerts, 1999; Pintrich, 2000; Tinajero et al., 2024). In self-regulated learning, the application of learning strategies is regulated through several processes like self-monitoring and evaluation processes that inform learners how close they are to achieving their learning objective (e.g., Boekaerts, 1999; Pintrich, 2000; Tinajero et al., 2024; Zimmerman & Moylan, 2009). These monitoring processes also include deciding whether or not to apply academic help-seeking strategies (also referred to as for example adaptive or strategic help seeking; Karabenick & Newman, 2006). Academic help-seeking encompasses cognitive, social, and affective-motivational processes (e.g., Karabenick & Berger, 2013; Karabenick & Newman, 2006; Martín-Arbós et al., 2021; Newman, 1990). In research, academic help-seeking mostly describes the proactive search for support in a social-interactive process (e.g., help seeking from other people such as peers or teachers; Karabenick & Knapp, 1991; Zimmerman, 2008). The decision to seek help involves weighing perceived benefits and costs. Criteria for evaluating help-seeking as beneficial are, for example, motivational orientations (e.g., achieving personal learning goals) or the desire to perceive competence (e.g., through solving a task well; e.g., Martín-Arbós et al., 2021; Newman, 1990). At the same time, this desire can lead to avoidance of help-seeking because the learner wants to solve the task independently (Butler, 1998; Martín-Arbós et al., 2021). The costs of asking for help include negative feelings, such as worries about being perceived as less competent by classmates or teachers, or feelings of shame (Butler, 1998; Karabenick & Knapp, 1991).

As far as we know, previous research on academic help-seeking predominantly investigated personal support (e.g., asking teachers or peers; Martín-Arbós et al., 2021), but not material support through hard scaffolds such as incremental scaffolds. So far, research on learners' reasons for the (non-)use of optional support provided by incremental scaffolds (or their components) is scarce. Besides investigating the effects of different instructional approaches, one

further aim of the current study was the examination of reasons for (not) using such optional support.

Current study and research questions

This study aimed to examine how different instructional approaches with optional support – comprehensive incremental scaffolds, incremental prompts, and incremental worked-out examples – affect cognitive (students' learning performance) and motivational (students' self-efficacy expectations and intrinsic motivation during the intervention) outcomes in biology lessons dealing with phylogenetic trees. Based on the previous considerations in the theoretical background, we investigated the following research question (RQ):

1. *How do different instructional approaches with optional support affect students' (a) learning performance, (b) change in students' self-efficacy expectations regarding their phylogenetic tree reading skills, and (c) intrinsic motivation during intervention?*

We expect that all three learning methods will result in improved knowledge as an indicator of learning performance (RQ1a; e.g., Chen et al., 2023; Schmidt-Borcherding et al., 2013) and a change in self-efficacy expectations (RQ1b; e.g., Gentner & Seufert, 2020; Glogger-Frey et al., 2015). The two-part structure of the incremental scaffolds (the combination of prompts and worked-out examples) provides learners with multiple approaches to engage with the learning content. Therefore, we expect these changes to be more pronounced in favour of the incremental scaffolds, also with regard to intrinsic motivation (RQ1c; e.g., Schmidt-Borcherding et al., 2013; Zeitlhofer et al., 2023).

As the use of the optional support was voluntary, not all students used it. To gain deeper insight into potential factors related to the (non-)use of the optional support, we additionally conducted exploratory analyses to extend the previous analyses of the first research question. To this end, we first considered the impact of students' biology-related prerequisites (prior knowledge, content-related and biology-related self-efficacy expectations, and intrinsic motivation in biology class) on their help-seeking behaviour regarding the optional support. Secondly, we analysed the possible effects of the students' decisions for the (non-)use of optional support on cognitive and motivational outcomes. Lastly, we evaluated possible reasons for the (non-)use of optional support. In an exploratory approach, we therefore examined the following research questions:

2. *Do students, who use the optional support, differ in their (a) prior knowledge of phylogenetic trees, (b) initial self-efficacy expectations regarding their phylogenetic*

tree reading skills, (c) biology-related self-efficacy expectations, (d) intrinsic motivation in biology class from students, who do not use this support?

3. *Do students, who use the optional support, differ in their (a) learning performance, (b) change in self-efficacy expectations regarding their phylogenetic tree reading skills, and (c) intrinsic motivation during intervention from students, who do not use this support?*
4. *Which factors related to the (non-)use of the optional support were considered important by the students?*

Methods

Sample/Participants

A total of $N = 133$ upper secondary school students (55% female) from nine classes (grade 11 and 12) in North Rhine-Westphalia took part in this experimental study. Students either attended grammar ($n = 107$) or comprehensive ($n = 26$) school, both corresponding to the ISCED3 level (Eurydice, 2021).

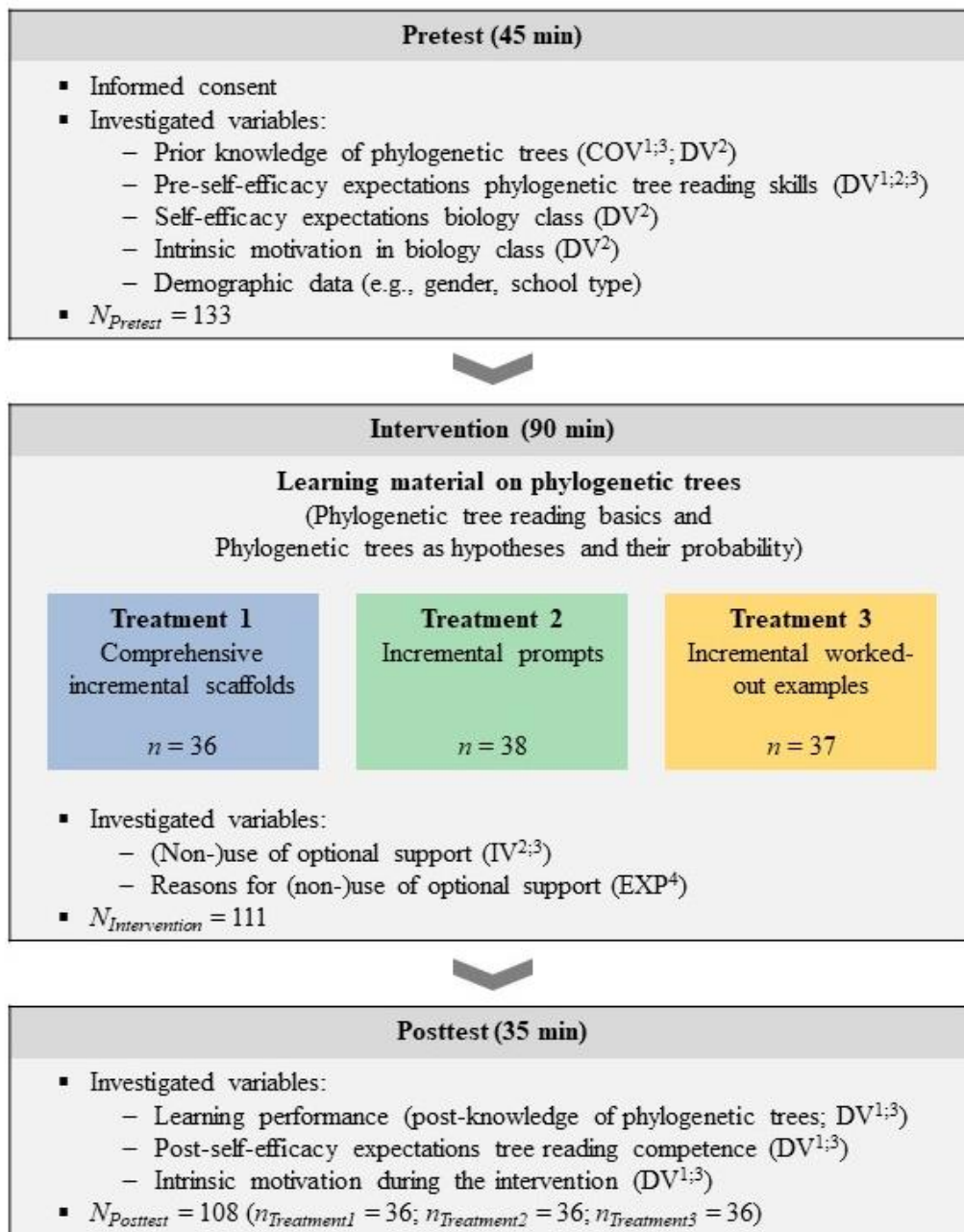
Study design and procedure

We adopted a quantitative approach and conducted an experimental intervention study using a pre-test-post-test design. In the pre-test (45 minutes), we assessed students' knowledge of phylogenetic trees, their self-efficacy expectations regarding phylogenetic tree reading and biology skills, their intrinsic motivation in biology class, and demographic data (e.g., gender and school type). We randomly assigned students to one of three treatments during the intervention phase of 90 minutes, each implementing a specific instructional approach with optional support. Students in the first treatment received optional support through comprehensive incremental scaffolds (incremental prompts and responding incremental worked-out examples). Students in the second treatment received optional support through incremental prompts. Students in the third treatment received optional support through incremental worked-out examples. Students completed the learning material individually to control for potential social effects. To standardise the administration and ensure procedural objectivity, no questions about the content were allowed to ask. The experimenter's responsibilities included organising the learning environment and ensuring that the intervention was implemented according to established protocols. The experimenter prepared the learning environment in advance of the intervention by arranging the learning material and the corresponding optional support at each workstation. To avoid visual differences, the arrangement of materials was kept consistent across all treatments. Care

was taken to alternate treatments one to three during the setup process, allowing for a randomized assignment of learners within each class to the different treatment conditions. In the posttest (35 minutes), we assessed students' knowledge of phylogenetic trees, their self-efficacy expectations regarding phylogenetic tree reading skills, and their intrinsic motivation during the intervention (see Figure 2). The three measurements were conducted during successive biology lessons, following the schedule of the respective course.

Figure 2

Study design (including the three test times, the treatments and variables)



Note. COV = covariate, DV = dependent variable, IV = independent variable, EXP = explorative items; The superscript numbers refer to the respective research question.

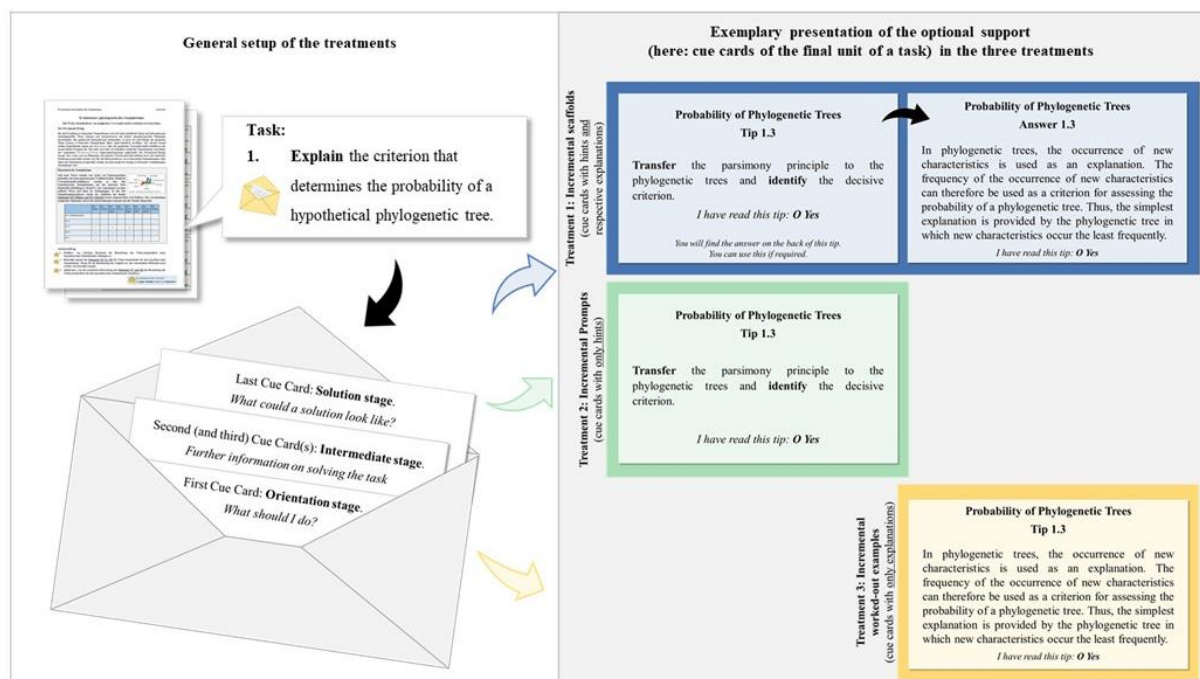
Preparation of the optional support

Across all treatments, the learning material was consistent and consisted of two parts. The first part of the intervention introduced the basics of reading phylogenetic trees: Learners received an informational text on the structure and interpretation of phylogenetic trees. In the first task, they applied this foundational knowledge by analysing exemplary phylogenetic trees, inferring evolutionary relationships, and comparing different types of tree representation. The second, more advanced part focused on analysing phylogenetic trees as hypotheses – representing possible evolutionary relationships – and assessing the probability of these hypotheses: Here, a complex task was introduced. This task involved evaluating hypothetical phylogenetic trees for six fictional species. To this end, learners explored the principle of parsimony, applying it to assess the likelihood of the different phylogenetic hypotheses and to identify the most plausible evolutionary pathways.

In all treatments, optional support was provided in envelopes, each corresponding to one of the six tasks in the learning material. To clarify the connection between an envelope and the task, each envelope was numbered according to the respective task number in the learning material. Depending on the task, an envelope contained three to four cue cards representing the incremental units of the optional support (see Figure 3 for an example of the setup of the treatments). Envelopes in the first treatment contained cue cards, providing full optional support through comprehensive incremental scaffolds (cue cards with incremental prompts on the front side of the cue card and with responding incremental worked-out examples on the back side; see blue box in Figure 1 for an example); envelopes in the second treatment contained cue cards, solely offering incremental prompts for solving the task (see green cards in Figure 1 for an example). Envelopes in the third treatment contained cue cards, solely offering incremental worked-out examples that guide students step-by-step to the solution (see yellow cards in Figure 1 for an example).

Figure 3

Set up of the three treatments.



Note. Example of the learning material, presenting an exemplary task (top left) and the optional support with its general structure (cue cards enclosed in an envelope, similar in all treatments; bottom left). On the right: Specific examples of optional support (cue cards for the solution stage) in the three treatments corresponding to the task presented on the left.

In line with the structure of incremental scaffolds, as outlined in the theoretical background, the cue cards within an envelope were designed to build on each other, gradually becoming more specific. Consequently, the next cue card should only be used if the preceding one fails to provide sufficient assistance in solving the task. Since the use of the cue cards was optional, students had to decide whether or not to use them. To track whether students used a cue card, they were asked to indicate this by marking the “I have read this tip” box on the bottom of the card. The used cue cards were then collected in individual envelopes for later evaluation.

Measures and instruments

Learning performance and prior knowledge

In the post-test, we administered the BETTSI 3.0 instrument (Jenkins et al., 2022) to assess students’ learning Performance. This instrument measures knowledge of phylogenetic trees, focusing on their understanding of relationships between represented entities, trait changes in lineages, and the different types of phylogenetic trees. The BETTSI 3.0 instrument was translated from English into German. To ensure accuracy, the translation was back-translated into English and compared with the original to verify that all aspects were preserved. An additional

item was added to align the instrument with the intervention concerning determining the probability of phylogenetic trees. A reliability analysis indicated that two items from the BETTSI 3.0 should be excluded from the scale, while the additional item on the probability determination of phylogenetic trees remained. The decision to exclude certain items was based on their negative correlations with the overall scale, structural inconsistencies, and conceptual ambiguities. The final learning performance scale consisted of eight single-choice items and, yielded a Kuder-Richardson reliability coefficient (KR-20) of .52. Although this value is considered low, particularly by current psychometric standards, it may still be acceptable for group-level comparisons, as suggested by Lienert and Raatz (1998). In the present study, we focus exclusively on group-level comparisons rather than individual-level decision-making. To further examine the construct validity of the scale and to assess whether the items measure a single underlying dimension, we conducted a Rasch analysis (Hattie, 1985). The Rasch analyses showed that all Infit-values ranged from 0.60 to 1.09, and Outfit-values ranged from 0.90 to 1.07. These values fall well within the commonly recommended threshold of 0.5 and 1.5 (Linacre, 2002; Wright & Linacre, 1994), suggesting acceptable model fit.

We assessed students' prior knowledge of phylogenetic trees in the pre-test with five open-response items. These items were based on the post-test (Jenkins et al., 2022) to ensure consistent but more straightforward access to the students' ideas regarding phylogenetic trees before the intervention. A maximum of nine points could be achieved in the test ($M = 3.93$, $SD = 1.44$). The data were analysed using a coding guide, and 25% of the responses were also coded by an interrater, resulting in a substantial weighted Cohens Kappa of $\kappa = .77$ (Cohen, 1968; Landis & Koch, 1977).

Self-efficacy expectations

We assessed students' self-efficacy expectations related to phylogenetic tree reading skills and general biology skills to investigate the intervention's effects and their relation to students' actual help-seeking behaviour (i.e., the [non-]use of optional support in the three treatments). To measure general biology-related self-efficacy, we used the abridged version of the school-related self-efficacy scale developed by Jerusalem and Satow (1999), which consists of five items. The original items were adapted to reflect biology-specific self-efficacy by explicitly referencing "biology classes" instead of the general school-related formulations in the original scale. Responses on the 4-point rating scale yielded a reliable Cronbach's α of .81 ($M = 2.75$, $SD = 0.68$).

Since no dedicated instrument existed for assessing self-efficacy expectations specifically related to phylogenetic tree reading, we developed a set of five items based on the science-related self-efficacy scale used in the PISA studies and further validated self-efficacy scales in the STEM domain (e.g., Luo et al., 2021; OECD, 2009; Pekrun, 2006). The resulting items also rated on a 4-point scale, demonstrated high reliability in both the pre-test (Cronbach's $\alpha = .88$, $M = 2.18$, $SD = 0.82$) and the post-test (Cronbach's $\alpha = .84$, $M = 3.17$, $SD = 0.57$).

Intrinsic motivation

To determine the effect of the treatments on intrinsic motivation, we employed the Short Scale of Intrinsic Motivation (Wilde et al., 2009) after the intervention. This instrument assesses four predictors (subscales) of intrinsic motivation: interest/enjoyment (Cronbach's $\alpha = 0.84$, $M = 3.05$, $SD = 0.85$), perceived competence (Cronbach's $\alpha = 0.84$, $M = 3.20$, $SD = 0.87$), perceived choice (Cronbach's $\alpha = 0.70$, $M = 3.41$, $SD = 0.89$), and pressure/tension (Cronbach's $\alpha = 0.73$, $M = 2.27$, $SD = 0.88$) during the intervention. Each subscale consists of three items rated on a 5-point Likert scale.

To control for potential confounding variables that might affect the outcomes, students' intrinsic motivation in their regular biology class was assessed in the pre-test using the respective subscale of the Scales Measuring Motivational Regulation for Learning (Thomas & Müller, 2016). This subscale includes three items rated on a 4-point rating scale (Cronbach's $\alpha = 0.76$, $M = 2.49$, $SD = 0.70$).

Help-seeking behaviour

At the end of the intervention, students' reasons for the (non-)use of the optional support were assessed exploratively. The potential categories (e.g., desire of perceiving competence, feelings of embarrassment in front of peers or teachers) were derived from previous academic help-seeking questionnaires, which, however, mainly relate to personal support (e.g., Butler, 1998; Karabenick & Knapp, 1991; Newman, 1990). Furthermore, aspects of metacognitive learning strategies (e.g., Pintrich, 2000; Zimmerman & Moylan, 2009) and the potential influence of a novelty effect (Reeve, 1989) were considered. Based on the state of research presented in the theoretical background and the review of the aforementioned instruments, we developed a set of items to establish learners' reasons for (non-)using the support in form of different potential categories. These categories cover learners' possible considerations during the task solving process, the handling of optional support and the social structure in class. When developing the categories, care was taken to ensure that the items for the use and non-use covered as many

contrasting aspects as possible (e.g., *struggles with independent task solving* as a reason for the use of optional support vs. *desire for independent task solving* as a reason for the non-use of optional support. This procedure led to six items identifying reasons for and seven items identifying reasons against using optional support (for a detailed presentation of the items and descriptive results see Supplement, Table S1). A four-point rating scale was applied in parallel with the other scales used in the pre-test of this study.

Data analysis

To analyse our data, we used the SPSS version 29 and set the alpha level to .05. We previously carried out preliminary analyses to determine the suitability of the conducted analyses. Then we first conducted an analysis of covariance (ANCOVA) with learning performance as the dependent variable, treatment group as the independent variable, and prior knowledge as a covariate to determine learning performance (RQ1a). In a subsequent repeated measures analysis of variance (rmANOVA), we analysed learners' change in self-efficacy expectations. Here, self-efficacy expectations at two time points (pre- and post-test) served as the dependent variable, with treatment group as the between-subjects factor (RQ1b). To answer RQ1c, we examined possible differences in students' intrinsic motivation during the intervention (dependent variables: interest/enjoyment, perceived competence, perceived choice, and pressure/tension) between the three treatments (independent variables) by conducting a multivariate analysis of variance (MANOVA). With regard to RQ2, we present descriptive results and conducted a MANOVA with the independent variable (non-)use of optional support and the pre-test variables as dependent variables. Analyses to answer RQ3 were conducted analogous to the procedures for RQ but with the (non-)use of optional support as the grouping variable. If a MANOVA was followed multiple comparisons (post-hoc ANOVAs; RQ 2 and RQ3c), a Bonferroni-Holm correction of the alpha level was performed to reduce the Type I error rate. In addition, we present descriptive results to answer RQ4.

Results

RQ1: Effects of different instructional approaches

Before addressing our research questions, we examined potential baseline differences in pre-test variables across the three treatment groups. The results of the Kruskal-Wallis tests (for metric variables like initial self-efficacy expectations regarding tree reading skills) and the χ^2 -test (for categorical variables like gender) did not reveal significant differences between students of the three treatments (for results see Supplement, Table S2 and S3).

According to our first research question, we examined whether students' learning performance, change in self-efficacy expectations, and intrinsic motivation during the intervention differed between the three treatment groups. For this analysis, we included only those students who took part in all three assessments ($N = 108$; see Figure 2 for details on sample size development). Contrary to our assumptions, ANCOVA revealed no significant differences in students' learning performance between the treatment groups, $F(2, 104) = 0.12$, $p = .887$, $\eta_p^2 = .00$ (RQ 1a). With regard to possible differences in students' pre- and post-self-efficacy expectations regarding their phylogenetic tree reading skills rmANOVA revealed a significant main effect of time that indicates an increase in self-efficacy expectation as a result of the intervention, $F(1, 105) = 133.38$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .56$. Unexpectedly, neither a significant effect of treatment, $F(2, 105) = 0.31$, $p = .735$, $\eta_p^2 = .01$, nor a significant interaction between time and treatment, $F(2, 105) = 0.05$, $p = .955$, $\eta_p^2 = .00$, was found (RQ1b). Opposing to our expectations, MANOVA did not show significant differences in students' intrinsic motivation during the intervention between the three treatments, $F(8, 204) = 0.376$, $p = .933$, $\eta_p^2 = .02$, Wilks' $\Lambda = .97$ (RQ1c).

As the use of the support was optional, not all students took advantage of it. The proportion of students who used the optional support was 64% in the first treatment group, 58% in the second treatment group, and 44% in the third treatment group. As an additional exploratory approach, these reduced subsamples ($n_{Treatment1} = 23$; $n_{Treatment2} = 21$; $n_{Treatment3} = 16$) were also examined in relation to research question 1, which likewise revealed no significant differences between the three treatments (see discussion section for statistical issues arising from this approach).

RQ2: Differences in students' biology-related prerequisites regarding the (non-)use of optional support

Since the students consciously decided to (not) use it, the (non-)use of optional support offers the opportunity to investigate possible differences between students who used and who did not use the optional support. We created two groups *use* ($n = 61$) and *non-use* ($n = 50$) of optional support by combining the participants of the three treatments. As the learning material was identical in all treatments the initial decision to (not) use optional support was not affected by the type of optional support itself which allows to distinguish the two groups for analyses regarding the pre-test variables. Analyses regarding the post-test variables separated by the (non-)use of optional support are covered by the missing significance between the three treatments (see results of RQ1). For a descriptive comparison of (non-)users pre- and post-test results, see Table 1 and 2.

Table 1

Means and standard deviations of the pre-test variables for the (non-)use of optional support.

Variable		Compared groups			
		Use (<i>n</i> = 61)		Non-Use (<i>n</i> = 50)	
		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Prior knowledge	Phylogenetic trees	3.75	1.45	4.35	1.31
Self-efficacy expectations	Tree reading competence	1.96	0.79	2.40	0.83
	Biology class	2.64	0.65	2.97	0.60
Intrinsic motivation	Biology class	2.31	0.68	2.74	0.66

Table 2

Means and standard deviations of the post-test variables for the (non-)use of optional support.

Variable		Compared groups			
		Use (<i>n</i> = 58)		Non-Use (<i>n</i> = 50)	
		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Learning performance	Phylogenetic trees	5.31	1.51	6.08	1.29
Self-efficacy expectations	Tree reading competence	2.99	0.83	3.38	0.47
Intrinsic motivation	Interest/enjoyment	2.82	0.83	3.31	0.81
	Perceived competence	3.05	0.88	3.37	0.83
	Perceived choice	3.39	0.97	3.42	0.81
	Pressure/tension	2.40	0.91	2.27	0.88

According to our second research question, we examined whether students who used optional support differed in pre-test variables (see Table 1) from those who did not use the optional support. MANOVA revealed significant results, $F(4, 106) = 4.52$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .15$, Wilk's $\Lambda = .854$. Post-hoc ANOVAs showed significant differences, with the non-users showing higher prior knowledge of phylogenetic trees, $F(1, 109) = 5.18$, $p = .025$, $\eta_p^2 = .05$, higher self-efficacy expectations regarding phylogenetic tree reading skills, $F(1, 109) = 7.90$, $p = .018$, $\eta_p^2 = .07$, higher self-efficacy expectations in biology class, $F(1, 109) = 7.37$, $p = .018$, $\eta_p^2 = .06$, and higher intrinsic motivation in biology class, $F(1, 109) = 11.19$, $p = .004$, $\eta_p^2 = .09$, than the users.

RQ3: Differences in students' cognitive and motivational outcome based on the (non-)use of optional support

According to our third research question, we examined differences in students' learning performance, change in self-efficacy expectations, and intrinsic motivation during the intervention. The results of the ANCOVA revealed significant differences between the two groups, $F(1, 105) = 4.468, p = .037, \eta_p^2 = .40$, with non-users showing higher learning performance than users (see Table 2; RQ3a).

Subsequently, we examined whether students differed in their change in self-efficacy expectations regarding their phylogenetic tree reading skills depending on the (non-)use of optional support (RQ3b). The conducted rmANOVA revealed a significant main effect of time, $F(1, 106) = 133.36, p < .001, \eta_p^2 = .56$, and a significant main effect of the (non-)use of optional support, $F(1, 106) = 17.64, p < .001, \eta_p^2 = .14$, but no significant interaction between time and (non-)use of the optional support, $F(1, 106) = 0.11, p = .738, \eta_p^2 = .00$. That is, despite initial differences in self-efficacy expectation (non-users showing higher self-efficacy expectations), the students increased their self-efficacy expectation to the same extent after the intervention. The (non-)use of the optional support did not influence the extent of the increase in self-efficacy expectation.

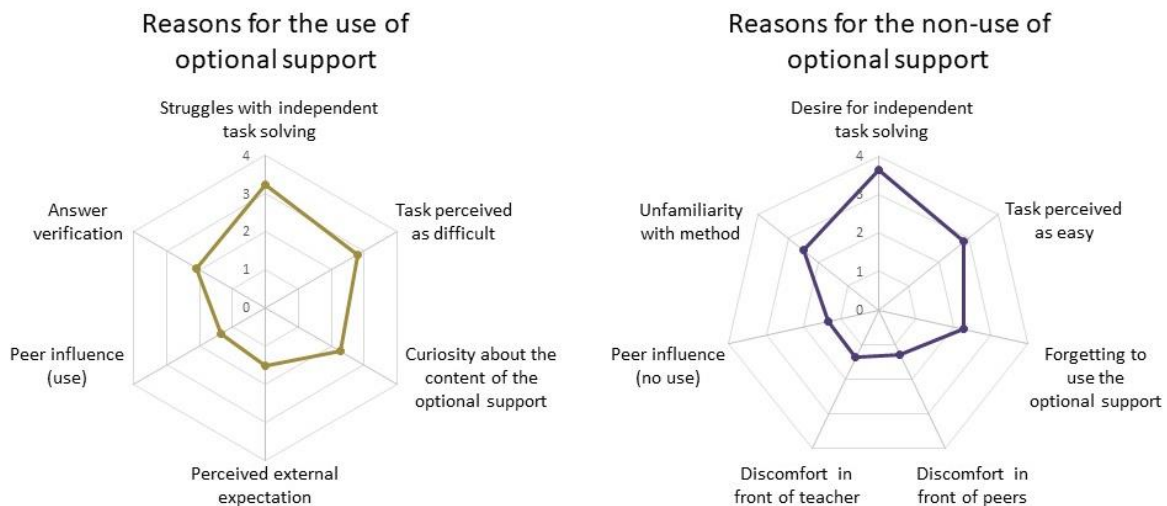
Finally, we examined whether the students differed in their intrinsic motivation during the intervention by conducting another MANOVA (RQ3c). The overall model became significant, $F(4, 103) = 2.93, p = .024, \eta_p^2 = .10$, Wilk's $\Lambda = .898$. Post-hoc ANOVAs revealed a significant difference in students' perceived interest/enjoyment (with non-users scoring higher), $F(1, 106) = 9.68, p = .008, \eta_p^2 = .08$, but did not show differences in students' perceived competence, $F(1, 106) = 3.79, p = .162, \eta_p^2 = .04$, perceived choice, $F(1, 106) = 0.04, p = .851, \eta_p^2 = .00$, and pressure/tension, $F(1, 106) = 2.71, p = .206, \eta_p^2 = .03$.

RQ4: Reasons for (non-)use of optional support

According to our fourth research question, we examined possible reasons for the (non-)use of optional support. We pursued an explorative approach to identify initial indications of possible reasons for the (non-)use of optional support. Based on the descriptive results (see Supplement, Table S1) we created two spider charts to visualise students' ratings in the different categories (see Figure 4). For this purpose, we created one spider chart with the ratings for use (left) and one with the ratings for the non-use (right) of the optional support. We used the mean values of the ratings for each item as the basis for the chart. The further a value is from the centre, the

higher is the average agreement with the statement of the item (e.g., the perception of the task as difficult). The maximum possible score for each item is four.

Figure 4
Rating of reasons for the (non-)use of optional support.



Note. Students' ratings in the different categories for the use (left) or non-use (right) of optional support based on descriptive results. 1 = strongly disagree, 2 = disagree, 3 = agree, 4 = strongly agree.

Discussion

Our study examined the effectiveness of three instructional approaches with optional support for student learning: comprehensive incremental scaffolds, incremental prompts, and incremental worked-out examples. These approaches were analysed regarding their impact on students' learning performance, their self-efficacy expectations, and their intrinsic motivation during the intervention (RQ1). Contrary to our assumption that the three types of optional support influence learning outcome differently, we did not observe statistically significant differences across the measured variables between the three treatments (RQ1). Our findings are consistent with some previous studies that found comparable learning performances between incremental scaffolds and other support strategies, such as worked-out examples (Großmann & Wilde, 2019; Schmidt-Borcherding et al., 2013). Regarding intrinsic motivation in hands-on learning situations, previous research is also heterogeneous, with some studies favouring incremental scaffolds (e.g., Schmidt-Borcherding et al., 2013) and others supporting alternative instructional approaches (e.g., Stiller & Wilde, 2023). However, typical learning situations in biology class often focus on theoretical content. Therefore, we investigated the use of incremental scaffolds in the context of evolution, specifically with the demanding process of understanding

phylogenetic trees (e.g., Blacquiere & Hoese, 2016; Jenkins et al., 2022; Schramm & Schmiemann, 2019). To follow the intended use of incremental scaffolds, support options in our study were optional and students had to decide whether or not to employ them independently. The challenge of self-regulated help-seeking through incremental scaffolds lies in accurately assessing whether additional support is needed – a task that can lead to metacognitive misjudgements (e.g., Tinajero et al., 2024). This need for accurate self-assessment could have influenced our findings, as students may not have consistently gauged their need for support accurately and as a result might have not used the optional support, even though they needed it. For example, the non-users rated the following categories *unfamiliarity with the method* as well as *forgetting to use the optional support* in a medium range (RQ4). Thus, when users and non-users are summed up in one sample of a treatment, possible differences in the effectiveness of the treatment might be obscured by students' different help-seeking behaviour. To draw meaningful conclusions about the effects of different instructional approaches, future studies should separately examine students who voluntarily used the optional support. In our study, the subsamples of students who used the optional support in each treatment were very small and unequal in size, which limits the significance of the exploratory results.

Based on these assumptions, we decided to conduct additional explorative analyses to gain a deeper understanding of potential factors related to the (non-) use of optional support. Therefore, we subsequently examined the students' characteristics associated with the (non-)use of optional support, irrespective of the treatments (RQ2 and RQ3). We found that students who decided not to use optional support had higher levels of prior knowledge, greater initial self-efficacy, and higher intrinsic motivation in general biology classes than those who used support (RQ2). These characteristics suggest that students appropriately evaluated their abilities and made reasoned decisions whether to use optional support. These results, for instance regarding learning performance, are in line with prior research which suggests that additional support is particularly beneficial for learners with less prior knowledge and skills (Großmann & Wilde, 2019; Kalyuga, 2007). Our findings supplement these previous findings by showing that students with less prior knowledge are likelier to engage with optional support, which might help to reduce the knowledge gap with non-users. However, optional support does not close the gap completely, as differences in learning performance persist between users and non-users (RQ3a). Students' feedback indicated that these differences may also be related to the nature of help-seeking behaviour, with some learners seeking immediate solutions rather than guidance (executive help-seeking; Karabenick & Knapp, 1991).

Results regarding the change in self-efficacy expectations between non-users and users point in a similar direction (RQ3b). Students who used optional support had lower scores in the pre- and post-test. However, self-efficacy expectations increased to the same extent in both groups relative to the pre-test score. This finding aligns with research suggesting that self-efficacy positively influences performance, particularly among weaker learners (e.g., Multon et al., 1991; Pajares, 1996; Weinberg et al., 1979). Thus, the slightly lower learning performance of students who used optional support might be explained by their lower self-efficacy expectations, highlighting the role of self-efficacy in effectively utilising optional support. Our examination of the appropriate use of optional support in relation to students' knowledge and self-efficacy expectations also might be reflected in students' reasoning for the (non-)use of optional support. Since students rated the following categories for the (non-)use of optional support *struggles with independent task solving*, the *desire for independent task solving*, as well as the *perception of a task as difficult or easy* highest (RQ4).

Students who used optional support also reported lower intrinsic motivation in their regular biology classes than those who did not. This tendency persists as they also differed in their self-reported intrinsic motivation during the intervention represented by the *interest/enjoyment scale* (Stiller & Wilde, 2023; Wilde et al., 2009; RQ3c). These findings suggest that the use of optional support does not have an impact on intrinsic motivation compared to non-use. This lower motivation is also reflected in the learners' reported moderate *curiosity about the content of the optional support* (RQ4), which indicates an absence of the novelty effect. The novelty effect positively affects intrinsic motivation and can occur in new situations, like applying a new learning method (Reeve, 1989) resulting in the use of optional support out of curiosity instead of need (see Mustafa et al., 2021).

The descriptive results revealed a moderate to high perception of competence and choice for users and non-users, even though these differences were insignificant (RQ3c). The only slightly lower scores of perceived competence for users suggest that optional support may allow students with lower biology-related prerequisites to feel competent. That is, when support is based on voluntariness, it might fulfil the purpose of guiding learners to work on the tasks independently and reinforcing the experience of competence. Academic help-seeking often has the function of achieving competence by solving tasks correctly (e.g., Martín-Arbós et al., 2021; Newman, 1990). In our study, this function seems not to be a main driver for students to use optional support in our study, as *answer verification* was rated moderately (RQ4).

The relatively high perception of choice could indicate that the voluntary use of optional support might promote the perception of the basic need for autonomy. However, such effects cannot be derived from our results, especially since previous results did not necessarily favour incremental scaffolds in terms of perceived autonomy (Schmidt-Borcherding et al., 2013; Stiller & Wilde, 2023). Therefore, future studies might test this assumption by adding a control group with no or mandatory support.

Users and non-users reported low pressure/tension during the intervention (RQ3c). This observation is consistent with students' ratings regarding their (non-)use of optional support, as students also rated the categories *perceived external expectation*, *discomfort in front of teachers and peers*, or the *peer influence* regarding the (non-)use as low (RQ4). Regarding students' academic help-seeking behaviour, this evaluation might indicate that application of optional material support (represented by individual cue cards) reduces negative feelings or costs compared to personal support such as asking teachers or peers for help (Butler, 1998; Karabenick & Knapp, 1991).

Given the inconsistent state of research on scaffolding, further research is necessary to clarify its effectiveness. Our study contributes by comparatively investigating isolated elements of scaffolding, while also considering learner-specific characteristics. The results highlight the importance to investigate the reasons behind students' (non-)use of scaffolding (e.g., through an additional qualitative approach) – as for scaffolding methods to be effective, they must be used by learners.

In terms of educational practice, our results indicate that all three types of scaffolding can be beneficial for supporting students in more theoretical biology topics such as evolution. Moreover, the findings show that optional support is generally well accepted by students. This suggests a promising strategy for teachers to assist multiple students with varying content-related needs simultaneously. It also offers learners the opportunity to take greater responsibility for their own learning and thereby may contribute to the development of self-efficacy expectations. The findings also indicate a potential need of teachers to motivate students to engage with the offered optional support.

Limitations

Given the design of the study, certain limitations should be considered when interpreting the results. In particular, dividing participants into three groups led to small subsample sizes, thereby restricting the generalizability of the findings. The low reliability of the knowledge test

(BETTSI 3.0) also limits the informative value regarding learning performance and may be attributable to the test not being suitable for the target group. While the Rasch analysis supports the assumption of unidimensionality at the level of item fit, we acknowledge that such statistics alone do not fully establish dimensionality. Additional analyses (e.g., principal component analysis of residuals) would be necessary to confirm this assumption more robustly. Given the moderate internal consistency, the total score should be interpreted with caution. Nevertheless, for the purpose of comparing group-level trends in this exploratory context, the scale is considered sufficiently reliable and structurally coherent. Additionally, the number of eight items could be too small for the sample size in this study, potentially limiting the accuracy of the Rasch analysis (Azizan et al., 2020; Linacre, 1994).

In addition, a control group should be included in future studies in order to test the effectiveness of the support offered. Such a control group could either work through the learning material without any support (1) or seek help from the teacher when necessary (2). However, the first approach harbours the risk that learners will not be able to work through the material without help, or only with difficulty, and may therefore not complete the learning unit (e.g., out of frustration). In the second approach, the social component is strengthened through interaction with the teacher, which was deliberately excluded in this study to control for potential social effects. The type of control group used therefore depends on the research question to be addressed in future studies.

As the intervention study was conducted in the field, i.e. in the respective schools, and not under laboratory conditions, possible confounding factors (e.g., stress due to upcoming exams) cannot be completely ruled out despite careful preparation of the learning environment. To keep the learning conditions visually the same for all, the optional support was provided in envelopes. However, this presentation of the optional support could have been an obstacle for some learners and thus may have reduced voluntary use. Therefore, future studies may provide the learning material in a digital form if the conditions in school allow for it.

Conclusion

This study aimed to evaluate the effectiveness of incremental scaffolds compared to their components (incremental prompts and incremental worked-out examples). We found no significant differences in learning outcomes between the three instructional approaches, which indicates similar effectiveness in typical worksheet learning situations. However, our study provides valuable starting points for further research, as we also analysed the (non-)use of the optional

support with regard to the characteristics of the students. It has shown that optional support was usually used by weaker students (e.g., with lower prior knowledge or lower self-efficacy expectations) or students who are less intrinsically motivated during general biology class. This suggests that students who need support for solving a task use it, even though the support is optional and their intrinsic motivation is slightly lower. Our findings also indicate a rather positive learning culture as the students did not experience pressure or tension during the intervention and also did not evaluate discomfort in front of the teacher or peers as important for their decision to (not) use the optional support.

We expected students to feel more competent or autonomous when they voluntarily used the optional support, but we did not find any difference between the students who used or did not use the optional support. However, this result is not surprising as students in both groups autonomously decided to (not) use the optional support. Also, the use of optional support when needed might have positively affected the feeling of competence of the students that needed support and as a result might have aligned their feeling of competence to the group of the students who did not use the optional support. For reliable conclusions in this direction, further research should follow that study design with optional support but should complement it with another treatment group that either receives mandatory support or any support at all.

Disclosure statement

The authors report there are no competing interests to declare.

Ethics statement

The study follows ethical standards and obeyed the local legislation (Ministry of the Interior of the State of North Rhine-Westphalia, 2022; World Medical Association, 2013). The participants were not exposed to high physical or psychological risks as claimed by the German Research Association (Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2023). Therefore, the study did not require an ethic board approval to be conducted in Germany. Before giving written informed consent, the participants were informed about the study's objectives, their rights (also explaining the procedure of merging the data of the three test times with a personal code) and the voluntariness of participation throughout the study, including the possibility of cancelling participation at any time.

Funding

No financial support was received.

Data availability

The data set on which the study is based can be accessed in the repository of the Open Science Framework at [available only after peer review process].

References

- Acosta-Gonzaga, E., & Ramirez-Arellano, A. (2022). Scaffolding Matters? Investigating Its Role in Motivation, Engagement and Learning Achievements in Higher Education. *Sustainability*, 14(20), 13419. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/20/13419>
- Arnold, J., Kremer, K., & Mayer, J. (2017). Scaffolding beim Forschenden Lernen [Scaffolding in research-based learning]. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 23(1), 21–37. <https://doi.org/10.1007/s40573-016-0053-0>
- Azizan, N. H., Mahmud, Z., & Rambli, A. (2020). Rasch Rating Scale Item Estimates using Maximum Likelihood Approach: Effects of Sample Size on the Accuracy and Bias of the Estimates. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2526–2531.
- Bandura, A. (1978). Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change. *Advances in Behaviour Research and Therapy*, 1(4), 139–161. [https://doi.org/10.1016/0146-6402\(78\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0146-6402(78)90002-4)
- Blacquiere, L. D., & Hoese, W. J. (2016). A valid assessment of students' skill in determining relationships on evolutionary trees. *Evolution: Education and Outreach*, 9, 5. <https://doi.org/10.1186/s12052-016-0056-9>
- Boekaerts, M. (1999). Self-regulated learning: where we are today. *International Journal of Educational Research*, 31(6), 445–457. [https://doi.org/10.1016/S0883-0355\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0883-0355(99)00014-2)
- Butler, R. (1998). Determinants of help seeking: Relations between perceived reasons for classroom help-avoidance and help-seeking behaviors in an experimental context. *Journal of educational psychology*, 90, 630–643. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.90.4.630>
- Catley, K. M. (2006). Darwin's missing link—a novel paradigm for evolution education. *Science Education*, 90(5), 767–783. <https://doi.org/10.1002/sce.20152>
- Catley, K. M., & Novick, L. R. (2009). Digging deep: Exploring college students' knowledge of macroevolutionary time. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(3), 311–332. <https://doi.org/10.1002/tea.20273>
- Chen, O., Endah, R., Yin, C. B. K., & and Kalyuga, S. (2023). The effect of worked examples on learning solution steps and knowledge transfer. *Educational Psychology*, 43(8), 914–928. <https://doi.org/10.1080/01443410.2023.2273762>
- Cohen, J. (1968). Weighted kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit. *Psychological Bulletin*, 70(4), 213–220. <https://doi.org/10.1037/h0026256>
- Deutsche Forschungsgemeinschaft. (2023). FAQ: Humanities and Social Sciences. <https://www.dfg.de/de/grundlagen-themen/fachwissenschaften/geistes-sozialwissenschaften/faq>

- Einsiedler, W., & Hardy, I. (2010). Kognitive Strukturierung im Unterricht. Einführung und Begriffsklärungen [Cognitive structuring in the classroom. Introduction and definitions]. *Unterrichtswissenschaft*, 38(3), 194–209.
- Eurydice. (2021). *National specificities of the education system* https://eacea.ec.europa.eu/national-policies/eurydice/content/germany_en
- Gentner, N., & Seufert, T. (2020). The Double-Edged Interactions of Prompts and Self-efficacy. *Metacognition and Learning*, 15(2), 261-289. <https://doi.org/10.1007/s11409-020-09227-7>
- German National Academy of Sciences Leopoldina. (2017). *Teaching evolutionary biology at schools and universities*. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. Nationale Akademie der Wissenschaften. https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2017_Stellungnahme_Evolution_ENG.pdf
- Glogger-Frey, I., Fleischer, C., Grüny, L., Kappich, J., & Renkl, A. (2015). Inventing a solution and studying a worked solution prepare differently for learning from direct instruction. *Learning and Instruction*, 39, 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2015.05.001>
- Glogger-Frey, I., Treier, A.-K., & Renkl, A. (2022). How preparation-for-learning with a worked versus an open inventing problem affect subsequent learning processes in pre-service teachers. *Instructional Science*, 50(3), 451-473. <https://doi.org/10.1007/s11251-022-09577-6>
- Gonulal, T., & Loewen, S. (2018). Scaffolding Technique. In J. I. Lontas & M. DelliCarpini (Eds.), *The TESOL Encyclopedia of English Language Teaching*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118784235.eelt0180>
- Gregory, T. R. (2008). Understanding Evolutionary Trees. *Evolution: Education and Outreach*, 1(2), 121-137. <https://doi.org/10.1007/s12052-008-0035-x>
- Großmann, N., & Wilde, M. (2019). Experimentation in biology lessons: guided discovery through incremental scaffolds. *International Journal of Science Education*, 41(6), 759–781. <https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1579392>
- Guo, L. (2022). Using metacognitive prompts to enhance self-regulated learning and learning outcomes: A meta-analysis of experimental studies in computer-based learning environments. *Journal of Computer Assisted Learning*, 38(3), 811-832. <https://doi.org/10.1111/jcal.12650>
- Hänze, M., Schmidt-Weigand, F., & Stäudel, L. (2010). Gestufte Lernhilfen [Incremental Scaffolds]. In S. Boller & R. Lau (Eds.), *Individuelle Förderung durch innere Differenzierung. Ein Praxishandbuch für Lehrerinnen und Lehrer der Sekundarstufe II* (pp. 63–73). Beltz.
- Hattie, J. (1985). Methodology Review: Assessing Unidimensionality of Tests and Items. *Applied Psychological Measurement*, 9(2), 139-164. <https://doi.org/10.1177/014662168500900204>
- Hübner, S., Nückles, M., & Renkl, A. (2006). Prompting Cognitive and Metacognitive Processing in Writing-to-Learn Enhances Learning Outcomes. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 28. <https://escholarship.org/uc/item/6t560264>

- Jenkins, K. P., Mead, L., Baum, D. A., Daniel, K. L., Bucklin, C. J., Leone, E. A., Gibson, J. P., & Naegle, E. (2022). Developing the BETTSI: A tree-thinking diagnostic tool to assess individual elements of representational competence. *Evolution*, 76(4), 708–721. <https://doi.org/10.1111/evo.14458>
- Jerusalem, M., & Satow, L. (1999). Schulbezogene Selbstwirksamkeit [School-related self-efficacy]. In R. Schwarzer & M. Jerusalem (Eds.), *Skalen zur Erfassung von Lehrer- und Schülermerkmalen* (pp. 18–19). Humboldt-Universität zu Berlin.
- Kaiser, L. M., Großmann, N., & Wilde, M. (2020). The relationship between students' motivation and their perceived amount of basic psychological need satisfaction – a differentiated investigation of students' quality of motivation regarding biology. *International Journal of Science Education*, 42(17), 2801–2818. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1836690>
- Kalyuga, S. (2007). Expertise reversal effect and its implications for learner-tailored instruction. *Educational Psychology Review*, 19(4), 509–539. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9054-3>
- 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
- Karabenick, S. A., & Berger, J.-L. (2013). Help seeking as a self-regulated learning strategy. *Applications of Self-regulated Learning Across Diverse Disciplines: A Tribute to Barry J. Zimmerman*, 237–261. <https://doi.org/10.4324/9781315697048-27>
- Karabenick, S. A., & Knapp, J. R. (1991). Relationship of academic help seeking to the use of learning strategies and other instrumental achievement behavior in college students. *Journal of educational psychology*, 83(2), 221–230. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.83.2.221>
- Karabenick, S. A., & Newman, R. S. (2006). *Help seeking in academic settings: Goals, groups, and contexts*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203726563>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Lienert, G. A., & Raatz, U. (1998). *Testaufbau und Testanalyse [Test setup and test analysis]*. Psychologie Verlags Union.
- Linacre, J. (1994). Sample Size and Item Calibration Stability. 7, 328.
- Linacre, J. (2002). What do infit and outfit, mean-square and standardized mean? *Rasch Measurement Transactions*, 16(2), 878.
- Luo, T., So, W. W. M., Li, W. C., & Yao, J. (2021). The Development and Validation of a Survey for Evaluating Primary Students' Self-efficacy in STEM Activities. *Journal of Science Education and Technology*, 30(3), 408–419. <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09882-0>
- Martín-Arbós, S., Castarlenas, E., & Dueñas, J.-M. (2021). Help-seeking in an academic context: A systematic review. *Sustainability*, 13(8), 4460. <https://doi.org/10.3390/su13084460>
- Ministry of the Interior of the State of North Rhine-Westphalia. (2022). *Schulgesetz für das Land Nordrhein-Westfalen (Schulgesetz NRW – SchulG) [School Act for the State of North Rhine-Westphalia]*. <https://bass.schul-welt.de/pdf/6043.pdf?20220912183404>

- Multon, K. D., Brown, S. D., & Lent, R. W. (1991). Relation of self-efficacy beliefs to academic outcomes: A meta-analytic investigation. *Journal of Counseling Psychology*, 38(1), 30–38. <https://doi.org/10.1037/0022-0167.38.1.30>
- Mustafa, M., Ioannidis, A., Ferreira González, L., Dabrowski, T., & Großschedl, J. (2021). Fostering learning with incremental scaffolds during chemical experimentation: A study on junior high school students working in peer-groups. *International Journal of Innovation in Science and Mathematics Education*, 29(2), 19–31. <https://doi.org/10.30722/IJISME.29.02.002>
- Newman, R. S. (1990). Children's help-seeking in the classroom: The role of motivational factors and attitudes. *Journal of educational psychology*, 82(1), 71–80. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.82.1.71>
- O'Hara, R. J. (1997). Population thinking and tree thinking in systematics. *Zoologica Scripta*, 26(4), 323–329. <https://doi.org/10.1111/j.1463-6409.1997.tb00422.x>
- OECD. (2009). *PISA 2006 Technical Report* (https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2009/01/pisa-2006-technical-report_g1gha795/9789264048096-en.pdf).
- Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2003). Cognitive Load Theory and Instructional Design: Recent Developments. *Educational Psychologist*, 38(1), 1–4. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_1
- Pajares, F. (1996). Self-efficacy beliefs in academic settings. *Review of Educational Research*, 66(4), 543–578. <https://doi.org/10.3102/00346543066004543>
- Pekrun, R. (2006). Research area 3: Students' engagement in science (*Contextual framework for PISA 2006* (pp. 41–56). OECD 2005.
- Pintrich, P. R. (2000). Chapter 14 – The role of goal orientation in self-regulated learning. In M. Boekaerts, P. R. Pintrich, & M. Zeidner (Eds.), *Handbook of Self-regulation* (pp. 451–502). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012109890-2/50043-3>
- Prat-Sala, M., & Redford, P. (2010). The interplay between motivation, self-efficacy, and approaches to studying. *Br J Educ Psychol*, 80(2), 283–305. <https://doi.org/10.1348/000709909x480563>
- Reeve, J. (1989). The interest-enjoyment distinction in intrinsic motivation. *Motivation and Emotion*, 13, 83–103. <https://doi.org/10.1007/BF00992956>
- Roelle, J., & Berthold, K. (2013). The expertise reversal effect in prompting focused processing of instructional explanations. *Instructional Science*, 41(4), 635–656. <https://doi.org/10.1007/s11251-012-9247-0>
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2020). Intrinsic and extrinsic motivation from a self-determination theory perspective: Definitions, theory, practices, and future directions. *Contemporary Educational Psychology*, 61, 101860. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2020.101860>
- Schmidt-Borcherding, F., Hänze, M., Wodzinski, R., & Rincke, K. (2013). Inquiring scaffolds in laboratory tasks: an instance of a “worked laboratory guide effect”? *European Journal of Psychology of Education*, 28(4), 1381–1395. <https://doi.org/10.1007/s10212-013-0171-8>

- Schmidt-Weigand, F., Franke-Braun, G., & Hänze, M. (2008). Erhöhen gestufte Lernhilfen die Effektivität von Lösungsbeispielen? [Do incremental scaffolds increase the effectiveness of worked-out examples?]. *Unterrichtswissenschaft*, 36(4), 365–384.
- Schmidt-Weigand, F., Hänze, M., & Wodzinski, R. (2009). Complex problem solving and worked examples. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 23(2), 129–138. <https://doi.org/10.1024/1010-0652.23.2.129>
- Schramm, T., & Schmiemann, P. (2019). Teleological pitfalls in reading evolutionary trees and ways to avoid them. *Evolution: Education and Outreach*, 12, 20. <https://doi.org/10.1186/s12052-019-0112-3>
- Smith, M. U. (2010). Current status of research in teaching and learning evolution: II. Pedagogical issues. *Science & Education*, 19(6), 539–571. <https://doi.org/10.1007/s11191-009-9216-4>
- Stiller, C., & Wilde, M. (2023). Full-structured or supported by incremental scaffolds? Effects on perceived competence and motivation. *The Journal of Experimental Education*, 1–22. <https://doi.org/10.1080/00220973.2023.2269128>
- Thomas, A., & Müller, F. (2016). Entwicklung und Validierung der Skalen zur motivationalen Regulation beim Lernen [Development and validation of scales for motivational regulation in learning]. *Diagnostica*, 62(2), 74–84. <https://doi.org/10.1026/0012-1924/a000137>
- Tinajero, C., Mayo, M. E., Villar, E., & Martínez-López, Z. (2024). Classic and modern models of self-regulated learning: integrative and componential analysis. *Frontiers in Psychology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1307574>
- van de Pol, J., & Elbers, E. (2013). Scaffolding student learning: A micro-analysis of teacher-student interaction. *Learning, Culture and Social Interaction*, 2(1), 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.lcsi.2012.12.001>
- van de Pol, J., Mercer, N., & Volman, M. (2019). Scaffolding student understanding in small-group work: Students' uptake of teacher support in subsequent small-group interaction. *Journal of the Learning Sciences*, 28(2), 206–239. <https://doi.org/10.1080/10508406.2018.1522258>
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in Society: Development of Higher Psychological Processes* (M. Cole, V. Jolm-Steiner, S. Scribner, & E. Souberman, Eds.). Harvard University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctvjf9vz4>
- Weinberg, R. S., Gould, D., & Jackson, A. (1979). Expectations and performance: An empirical test of Bandura's self-efficacy theory. *Journal of Sport Psychology*, 1(4), 320–331.
- Wilde, M., Bätz, K., Kovaleva, A., & Urhahne, D. (2009). Überprüfung einer Kurzsкала intrinsischer Motivation (KIM) [Review of a short scale for intrinsic motivation]. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 15, 31–45.
- Wood, D., Wood, H., & Middleton, D. (1978). An experimental evaluation of four face-to-face teaching strategies. *International Journal of Behavioral Development*, 1(2), 131–147. <https://doi.org/10.1177/016502547800100203>
- World Medical Association. (2013). World Medical Association Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects. *Jama*, 310(20), 2191–2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>

- Wright, B. D., & Linacre, J. (1994). Reasonable mean-square fit values. *Rasch Measurement Transactions*, 8(3), 370.
- Zeitlhofer, I., Hörmann, S., Mann, B., Hallinger, K., & Zumbach, J. (2023). Effects of Cognitive and Metacognitive Prompts on Learning Performance in Digital Learning Environments. *Knowledge*, 3(2), 277-292. <https://www.mdpi.com/2673-9585/3/2/19>
- Zimmerman, B. J. (2008). Investigating self-regulation and motivation: Historical nackground, methodological developments, and future prospects. *American Educational Research Journal*, 45(1), 166–183. <https://doi.org/10.3102/0002831207312909>
- Zimmerman, B. J., & Moylan, A. (2009). Self-regulation: Where metacognition and motivation intersect. In D. J. Hacker, J. Dunlosky, & A. C. Graesser (Eds.), *Handbook of metacognition in education* (pp. 299–315). Routledge/Taylor & Francis Group.

5.3 Do future biology teachers bug out with higher insect-related knowledge and more positive attitudes? A comparison of different education levels (Studie III)

Die folgenden Darstellungen beziehen sich auf das Originalmanuskript:

Gutowski, R., Novotný, P., Janštová, V., & Großschedl, J. (2025). Do future biology teachers bug out with higher insect-related knowledge and more positive attitudes? A comparison of different education levels [Original Research]. *Frontiers in Education*, Volume 9 – 2024. <https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1477841>.

Zu dem Originalmanuskript gehört ein Anhang mit Informationen zur Itementwicklung und zur Ermittlung der medialen Repräsentation ausgewählter Insektenarten, der unter <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feduc.2024.1477841/full#supplementary-material> abgerufen werden kann.

Die Daten, die dieser Studie zugrunde liegen, sind auf dem Datenserver des Open Science Framework gespeichert und können unter folgendem Link abgerufen werden: <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/W2ZDS>.

5.3.1 Vorstellung der Studie

Evolutionsbezogenes Wissen kann ein Verständnis ökologischer Zusammenhänge beispielsweise auf Basis von (Ko-)Evolution vermitteln und so für die Notwendigkeit eines verantwortungsvollen Umgangs mit der Natur sensibilisieren (Campbell et al., 2009; Catley, 2006; Europarat, 2007; Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, 2017). Evolutionsbezogenes Wissen ist somit eng mit Fragen gesamtgesellschaftlicher Verantwortung verbunden, welche die Wertschätzung und den Schutz von weniger beliebten Arten wie Insekten einschließt (Härtel et al., 2023; Kellert, 1993; Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, 2017). Insekten haben aufgrund ihrer großen Artenvielfalt eine hohe ökologische Bedeutung, da sie in Ökosystemen vielfältige Funktionen, beispielsweise als Nahrungsquelle für andere Lebewesen, als Pflanzenbestäuber oder als Destruenten, einnehmen (z. B. Campbell et al., 2009; Patel et al., 2021; Siviter et al., 2021).

Der Bestand der Insekten ist weltweit gefährdet (WWF, 2018). Ursächlich dafür ist vor allem die menschliche Lebensweise, die durch einen Abbau von Ökosystemen, übermäßigem Pestizideinsatz und die Veränderungen durch den Klimawandel gekennzeichnet ist (Patel et al., 2021; Siviter et al., 2021; WWF, 2018). Die daraus resultierende Verantwortung der Menschen kann als Teil des Bildungsauftrages angesehen werden und findet sich in den UNESCO

Nachhaltigkeitszielen der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung insbesondere in den (Kurz-)Punkten 12 bis 15 wieder (UNRIC, 2024):

12. Nachhaltiger Konsum und Produktion;

13. Maßnahmen zum Klimaschutz;

14. Leben unter Wasser;

15. Leben an Land.

Grundlage für verantwortungsvolles Handeln ist das themenbezogene Wissen (hier die Lebensweise von Insekten und ihre Bedeutung für Ökosysteme; Härtel et al., 2023; Hines et al., 1987). Die bisherige Forschung hat gezeigt, dass das insektenbezogene Wissen eher gering ausgeprägt ist (Bloom, 1956; Huxham et al., 2006) und Personen zum Teil sogar Schwierigkeiten bei der Identifikation bekannter Insekten haben (Silva & Minor, 2017). Dies kann unter anderem daran liegen, dass Insekten medial häufig unterrepräsentiert sind (Huxham et al., 2006). So thematisieren Kampagnen zum Umweltschutz überwiegend die Gefährdung der Artenvielfalt von Säugetieren (Clucas et al., 2008; Genovart et al., 2013).

Vergleichbar mit dem Kontext der Evolution gibt es Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen dem themenbezogenen Wissen und den entsprechenden Einstellungen. So konnte für verschiedene Arten ein positiver Zusammenhang zwischen dem artbezogenen Wissen und der Einstellung gegenüber der Art festgestellt werden (Hooykaas et al., 2019; Lindemann-Matthies, 2005; Prokop et al., 2008; Schlegel & Rupf, 2010). Bisherige Studien zeigen jedoch, dass Invertebraten (Wirbellose; zu denen die Insekten gehören) häufig mit negativen Einstellungen wie Ekel oder Angst verbunden werden (Kellert, 1993; Schlegel & Rupf, 2010). Diese negativen Einstellungen können den Zugang zu dem Thema Insekten potenziell erschweren (siehe Kapitel 2.2). In der artbezogenen Einstellungsforschung haben sich neun Dimensionen der Einstellung etabliert, von denen insbesondere die folgenden drei Dimensionen beforscht werden (Kellert, 1985; Prokop & Tunnicliffe, 2010; Prokop & Tunnicliffe, 2008):

- Die *naturalistische Dimension* zur Erfassung des Interesses und der Zuneigung zur Natur und ihren Lebewesen;
- Die *ökologische/ökowissenschaftliche Dimension* zur Erfassung des Verständnisses ökologischer Zusammenhänge;
- Die *negativistische Dimension* zur Erfassung der Ablehnung und Vermeidung von Arten.

Frühere Studien haben zudem Alters- und Bildungseffekte sowie geschlechterabhängige Effekte untersucht. Hierbei zeichnet sich die Tendenz ab, dass das Wissen über Invertebraten mit zunehmendem Alter und Bildungsstand steigt (Hooykaas et al., 2019; Huxham et al., 2006; Randler & Wieland, 2010). Die Studienlage zur Entwicklung der Einstellung ist hingegen weniger eindeutig. Einerseits hat sich gezeigt, dass ein höherer Bildungsstand zu positiveren Einstellungen führen kann (Bjerke & Østdahl, 2004; Kellert, 1993). Andererseits steigen mit zunehmenden Alter häufig Ängste, die zu negativen Einstellungen führen können (Kellert, 1993).

Die Untersuchung möglicher geschlechterabhängiger Effekte weisen auf einen möglichen Abbau von Unterschieden im Wissen hin. So verfügten männliche Personen in älteren Studien zwar über ein höheres Wissen über Invertebraten (z. B. Kellert, 1993; Kellert & Berry, 1987), diese Unterschiede wurden in einer aktuelleren Studie von Hooykaas et al. (2019) hingegen nicht mehr sichtbar. Aktuelle Studien weisen jedoch drauf hin, dass männliche Personen zu positiveren Einstellungen gegenüber Invertebraten tendieren und dass die Einstellungen weiblicher Personen vor allem durch höhere negativistische Einstellungen geprägt sind (Bjerke & Østdahl, 2004; Kellert, 1993; Vanderstock et al., 2022).

Die bisherige Studienlage hat das Thema Insekten häufig als Teil des allgemeinen Artenwissens oder innerhalb des Artenwissens zu Invertebraten betrachtet (z. B. Hooykaas et al., 2019; Kellert, 1993). Die spezifische Untersuchung des insektenbezogenen Wissens und den damit verbundenen Einstellungen in dieser Studie erweitert daher den aktuellen Forschungsstand. Um Schüler:innen bestmöglich in ihrem Lernen fördern zu können, sollten potenziell relevante personenbezogene Variablen in Bezug auf das Thema Insekten untersucht und auf ihre Aktualität (z. B. hinsichtlich geschlechterbezogener Unterschiede) überprüft werden. In Anlehnung an die in Kapitel 2.1 und 2.2 dargestellten Studienergebnisse zu Bildungseffekten in Bezug auf das Wissen und die Einstellungen angehender Biologielehrkräfte im Kontext der Evolution, greift diese Studie bei der Betrachtung der Bildungsstände zusätzlich die Gruppe der angehenden Biologielehrkräfte auf. Zu diesem Zweck werden in der vorliegenden Studie folgende Forschungsfragen untersucht:

1. *Stehen das insektenbezogene Wissen und die Einstellung gegenüber Insekten in positivem Zusammenhang, wenn nach Bildungsstand unterschieden wird?*
2. *Unterscheiden sich Personen unterschiedlichen Bildungsstandes und Geschlechts hinsichtlich ihres insektenbezogenen Wissens und ihrer Einstellung gegenüber Insekten?*

Für diese querschnittlich angelegte Studie wurden insgesamt $N = 574$ Personen befragt. Neben der Erhebung demographischer Daten wurde das insektenbezogene Wissen durch Items zur Identifikation, Lebensweise und Bedeutung von Insekten erfasst. Ebenso wurden die Einstellungen gegenüber Insekten erhoben. Die Items zur Ermittlung der Einstellungen gegenüber Insekten kombinieren die naturalistischen, ökowissenschaftlichen und negativistischen Dimensionen der artbezogenen Einstellungsforschung mit den drei Komponenten (kognitiv, affektiv, verhaltensbezogene Komponente) des Multikomponentenmodells der Einstellung (siehe Kapitel 2.2). Die befragten Personen wurden den fünf Bildungsständen *Erprobungsstufe* (Beginn der Sekundarstufe I; $n = 82$), *Ende der Sekundarstufe I* ($n = 109$), *Sekundarstufe II* ($n = 171$), *Bachelor-* ($n = 93$) und *Masterstudium* ($n = 119$) im Lehramt für das Unterrichtsfach Biologie zugeordnet. Zudem identifizierten sich $n = 365$ Personen als weiblich und $n = 190$ als männlich.

5.3.2 Eigenanteile

Die dritte Studie dieser Dissertation wurde von Roxanne Gutowski, Dr. Petr Novotný, Dr. Vanda Janštová und Prof. Dr. Jörg Großschedl konzipiert. Die Daten wurden von Roxanne Gutowski erhoben und eingegeben. Roxanne Gutowski führte in Zusammenarbeit mit Dr. Petr Novotný die Datenanalyse durch. Roxanne Gutowski verfasste das Manuskript und reichte es ein. Die Visualisierungen erstellte Dr. Petr Novotný. Alle Autor:innen waren an der Überarbeitung des Manuskriptes beteiligt. Prof. Dr. Jörg Großschedl übernahm die Betreuung.

5.3.3 *Originalmanuskript zu Studie III*

Do future biology teachers bug out with higher insect-related knowledge and more positive attitudes? A comparison of different education levels

Roxanne Gutowski, Petr Novotný, Vanda Janštová and Jörg Großschedl

Introduction: Global species extinction rates are increasing, with a particularly severe impact on insects. Biology teachers are crucial in raising students' awareness of insects' importance for the economy (e.g., food production) and ecosystems. Consequently, it is essential for biology teachers to possess comprehensive knowledge about insects and to maintain a positive attitude toward them.

Methods: Therefore, our cross-sectional study examines the knowledge and attitudes of students across five educational levels with a particular focus on pre-service teachers: levels 1 to 3 represent secondary school students ($n = 362$) at different stages, while levels 4 and 5 represent pre-service biology teachers ($n = 212$) in the bachelor's and master's programs.

Results and discussion: Our results show a moderate to strong positive correlation between knowledge and attitudes across all education levels. Participants with a higher educational level have more knowledge on average. Participants in levels 1, 4, and 5 have more positive attitudes than those in levels 2 and 3. No gender differences were observed regarding knowledge but regarding attitudes, with males showing a more positive attitude.

Conclusion: Results indicate that pre-service biology teachers are well prepared, showing good insect-related knowledge and relatively positive attitudes.

Keywords biology education, knowledge about insects, attitudes toward insects, secondary school students, pre-service biology teachers, gender

1 Introduction

Biodiversity is declining worldwide due to human activities such as overexploitation, habitat destruction, and anthropogenic climate change (WWF, 2018). Educating the public about biodiversity loss and its consequences is essential for promoting informed discussions about human responsibility for environmental issues and fostering societal engagement (Kellert, 1993; Menzel and Bögeholz, 2006; Menzel, 2010). Knowledge (e.g., about diverse species and their way of life) and a positive attitude toward the environment and its creatures are crucial for shaping a sustainable future (e.g., Hines et al., 1987; Härtel et al., 2023). Teachers play a key

role in this process: they participate in societal discourse and prepare the younger generation to address future environmental challenges.

Insects are the most diverse group of living creatures and play a central role in ecosystems worldwide, as the importance of co-evolution between insects (especially bees) and plants in the agricultural sector shows (Campbell et al., 2009; European Food Safety Authority et al., 2020; Patel et al., 2021; Siviter et al., 2021). Nevertheless, they receive little attention in the public discourse on raising awareness of biodiversity loss compared to other species, such as mammals (Clucas et al., 2008; Genovart et al., 2013). In biology education studies, insects are also often underrepresented (even in studies focusing on invertebrates), limiting our understanding of knowledge and attitudes toward them (Kellert, 1993; Huxham et al., 2006; Hooykaas et al., 2019; Härtel et al., 2023). Previous results (mainly focusing on vertebrates) indicate a positive correlation between knowledge about an animal species (e.g., birds) and the attitude toward the species (Prokop et al., 2008a; Schlegel and Rupf, 2010; Hooykaas et al., 2019). Still, the relationship regarding insects is not fully understood yet. Older studies also attribute higher knowledge and positive attitudes toward invertebrates to male persons (Kellert, 1993; Bjerke and Østdahl, 2004).

Our study addresses these uncertainties by focusing exclusively on insects. As the teachers mediate the learning process, this study examines pre-service teachers' knowledge about and attitudes toward insects compared to secondary school students. Furthermore, this study is devoted to whether gender differences exist today or have diminished (e.g., due to societal developments).

2 Theoretical background

Research in science education has shown that species knowledge, particularly invertebrate knowledge (Huxham et al., 2006; Härtel et al., 2023), is low but increases with age and education levels (e.g., from primary to secondary school and university; Huxham et al., 2006; Randler, 2010; Randler and Wieland, 2010; Hooykaas et al., 2019). Individual studies also show that people can more easily identify insects at the genus level than at the species level (Härtel et al., 2023) and struggle to name common insects such as bees correctly (Silva and Minor, 2017). In addition to educational effects, studies also report gender-related differences in knowledge and attitudes toward animals. For example, Huxham et al. (2006) reported that male elementary school students have higher knowledge about animals than females. In contrast, Prokop et al. (2008b) showed that Slovakian elementary and lower secondary school girls had higher general

knowledge about animal anatomy than boys but, at the same time, appeared to have more misconceptions about invertebrates.

Numerous studies have examined attitudes toward different animal species. Despite the ecological significance of invertebrates, people tend to have rejective (less positive; negativistic) attitudes toward this organismic group (Kellert, 1993; Bjerke and Østdahl, 2004; Schlegel and Rupf, 2010) as they often evoke feelings of anxiety, aversion, or antipathy (Kellert, 1993). Research also has shown a preference for insects perceived as esthetic or ecologically beneficial (e.g., ladybirds, butterflies) over insects categorized as pests or associated with disease (e.g., potato beetles, mosquitos; Kellert, 1993; Bjerke and Østdahl, 2004; Prokop and Tunnicliffe, 2010). In research on species-related attitudes, up to nine dimensions have been identified addressing different attitudinal characteristics. These include, for example, the animals' value to humans, such as their esthetic or utilitarian significance, as well as their ecological importance (Kellert, 1985). In the context of biology education, which aims to promote awareness of biodiversity (using insects as an example), particular attention is given to the naturalistic dimension – representing interest and affectivity in interacting with wildlife and nature – and the ecologicistic or ecoscientistic dimension, which encompasses an understanding of ecosystem interrelationships, such as species-habitat interactions and species knowledge (e.g., Kellert, 1985; Prokop and Tunnicliffe, 2010). Furthermore, previous studies have documented gender-related differences in attitudes toward animals, showing that males often exhibit more positive attitudes toward invertebrates. At the same time, females are more likely to express negativistic attitudes, such as disgust or anxiety (Kellert, 1993; Bjerke and Østdahl, 2004; Vanderstock et al., 2022). The *negativistic* dimension, which involves rejection and avoidance of insects, is therefore particularly relevant when examining sensitivity to biodiversity (Kellert, 1985; Prokop and Tunnicliffe, 2010). Accordingly, the naturalistic, ecoscientistic, and negativistic dimensions are frequently addressed in related research (Prokop and Tunnicliffe, 2008; Prokop and Tunnicliffe, 2010), including in our study. There is an indication that higher levels of education are associated with more positive attitudes toward different species (including insects; Kellert, 1993; Bjerke and Østdahl, 2004), but that age could also lead to less positive attitudes (e.g., on the negativistic or ecologicistic dimension; Kellert, 1993).

In contrast to research on species-related attitudes, the multi-component model of attitudes is widely used in general education research to describe attitudes. This model posits that attitudes toward an object (e.g., a species) are composed of three interrelated components: the *cognitive* component, which represents thoughts and beliefs about the object; the *affective* component,

which refers to emotions associated with the object; and the *behavioral* component, which reflect past behavior related to the object (Konnemann et al., 2012; Haddock and Maio, 2014). The species-related attitudinal dimensions integrate reactions that align with these components, as illustrated by the negativistic dimension: The perception of insects as useless corresponds to the cognitive component, feelings of disgust toward insects align with the affective component, and the intentional act of killing insects reflects the behavioral component. To provide a comprehensive framework for assessing insect-related attitudes, we developed a model that integrates the species-related dimensions with the multi-components model (see Methods section).

Research has demonstrated a positive relationship between species knowledge (e.g., identification skills, perception) and attitudes toward those species, such as affinity (Lindemann-Matthies, 2005; Schlegel and Rupf, 2010). This relationship provides a potential foundation for fostering students' ecological awareness, a responsibility in which biology teachers play a crucial role. To achieve this, teachers' subject matter knowledge about insects and their ecological importance is essential (Backman et al., 2019; Großschedl et al., 2019). Moreover, knowledge and attitudes about a certain topic have been identified as predictors of future behavior, such as engaging in societal discourse or implementing the topic in biology class (Ajzen, 1991; Aptyka and Großschedl, 2022). Studies on pre-service teachers have found that their intentions to implement species-related content into future biology classes are positively associated with their attitudes toward these species (Wagler, 2010). Additionally, demographic factors such as identified gender and age are predictive of species-related attitudes: male and elderly pre-service teachers tend to exhibit more positive attitudes toward unpopular species, such as cockroaches or grasshoppers (Wagler and Wagler, 2015). Age has also been identified as a predictor of the intention to include these species in biology lessons (Wagler and Wagler, 2015). However, as far as we know, no study has specifically examined the knowledge and attitudes of (pre-service) biology teachers' knowledge with a particular focus on insects.

3 Current study and research questions

The present study is a part of the research project “Entomology Education – An International Assessment of Knowledge and Practice,” which is a cooperation between different universities worldwide. The presented sub-project was conducted by members of the University of Cologne in Germany and the Charles University in the Czech Republic. The project was previously approved by the ethics committee from Charles University (approval number 2020/22).

Our study examines the extent to which pre-service biology teachers are equipped for teaching, with a focus on their knowledge and attitudes toward insects. We hypothesize that initial teacher training enhances pre-service teachers' insect-related knowledge and fosters more positive attitudes compared to secondary school students. To this end, we investigate the state of knowledge about and attitudes toward insects dependent on education level and gender. Based on the theoretical background, we answer the following research questions (RQ):

1. Do knowledge about and attitudes toward insects correlate positively in different education levels?
2. Do education level and gender affect knowledge about and attitudes toward insects?

4 Materials and methods

4.1 Sample

Our study collected data from $N = 574$ students from North Rhine-Westphalia. The students attended either lower or upper secondary school or university. The lower secondary school represents the first part of secondary school (starting in grade 5). The upper secondary school follows the lower secondary school and corresponds to the ISCED3 level (Eurydice, 2021). In the upper secondary school, students obtain the Abitur qualification, which qualifies them to study at university (comparable to A level). Within the sample, participants were grouped according to their education level, so the following four groups were considered for our analyses: *Level 1 students* (students of the first 2 years of lower secondary school; $n_{Level1} = 82$), *Level 2 students* (students of the final 2 years of lower secondary school; $n_{Level2} = 109$), *Level 3 students* (students of the upper secondary school; $n_{Level3} = 171$), *Level 4 students* (pre-service biology teachers in the bachelor's program; $n_{Level4} = 93$), and *Level 5 students* (pre-service biology teachers in the master's program; $n_{Level5} = 119$). In our sample, students who identify as female ($n_{female} = 365$) were the largest group, followed by students who identify as male ($n_{male} = 190$). Seven students reported being diverse, and 11 stated they did not want to provide any information about their gender. Due to small sample sizes, we compared students who identify as female with those who identify as male in our analyzes regarding gender.

4.2 Research design and procedures

As a part of a cross-sectional study, demographic data, education level, knowledge about and attitudes toward insects were collected. Participation in the study was voluntary, and the data was collected anonymously via a digital tool (*Limesurvey*). The study was conducted during

the biology lessons of the school students and different mandatory courses at the university for the pre-service teachers. It lasted 30–60 min, depending on the students' age.

4.3 Measures

We translated the “EntoEdu 2022” instrument (Lucky et al., in review)¹ into German in coordination with the EntoEdu team. One author of this article has translated the questionnaire into German. An external person with expertise in insects then reviewed the translation. The data was processed using a cleaning protocol (e.g., binarization of knowledge items, inversion of attitudes items).

4.3.1 Knowledge about insects

The knowledge about insects scale contains 27 items of the 50 items of the original instrument of Lucky et al. (in review, see footnote 1), resulting in a maximum score of 27 points covering 17 items on insect identification (morphology) and 10 items on lifestyle and importance of insects. The number of items was reduced to adapt the questionnaire to the target group, as individual items would be too difficult for the youngest students (level 1). The items were excluded based on two criteria: Difficult items were statistically identified in terms of their item difficulty for level 1 (threshold < 0.25). Also, all items were reviewed to ensure that their content was appropriate for level 1 students. For example, items requiring knowledge of technical terms that level 1 students do not know (e.g., endosymbiont) were excluded. In order not to compromise the validity of the questionnaire and to keep differences in the different education levels measurable, items with complex content that the level 1 students might also know were retained. Items on insect identification were kept regardless of their statistical item difficulty (see also chapter Results). The knowledge scale shows good to excellent Kuder Richardson reliability for dichotomous items (KR-20) of 0.83 ($M = 16.72$, $SD = 4.87$, range = 1–27).

4.3.2 Attitudes toward insects

The scale on attitudes toward insects covers 24 items on a 5-point Likert scale and contains 12 items from the instrument of Lucky et al. (in review, see footnote 1) and 12 self-developed additional items. The items were selected based on a model for item development that specific dimensions of attitudes (naturalistic, ecoscientistic, and negativistic dimension; Kellert, 1985; Prokop and Tunnicliffe, 2010) and the three components of the multi-component model of attitudes (cognitive, affective, and behavioral component; Konnemann et al., 2012; Haddock and

¹ Lucky, A., Janštová, V., Novotný, P., and Mourek, J. (in review). Quantifying ento-literacy: development and validation of an international insect-focused attitude and knowledge survey instrument. Berlin, Germany: International Journal of STEM Education.

Maio, 2014). This combination of both models led to nine cells, all systematically covered with test items (see Chapter S1 of the Supplementary material for the model for item development). Items on the naturalistic and ecoscientistic dimensions were recoded to equal the items of the negativistic dimension. High scores on the resulting attitudes scale indicate a positive attitude, whereas low scores represent a negative attitude toward insects. The reliability analysis reveals an excellent internal consistency of Cronbach's $\alpha = 0.89$ ($M = 3.31$, $SD = 0.59$, range = 1.33–4.83) for the scale.

4.4 Data analysis

We used SPSS version 29 to evaluate data. Alpha-level was set at 0.05, and preliminary analyses (e.g., Shapiro–Wilk-Test for normality, Levene-Test for homoscedasticity) were conducted to determine appropriate statistical procedures for the analyses. We performed Pearson product–moment correlations to investigate the relation between the two variables, knowledge about and attitudes toward insects. Afterwards, we compared the correlation coefficients of the different education levels via Fisher-z-transformation (RQ1). Furthermore, we ran a two-way MANOVA with the independent variables (education level, gender) and the dependent variables (knowledge about and attitudes toward insects) with subsequent repeated contrast analyses (RQ2). For visualization, we use R version 4.2.2 (R Core Team, 2022) with packages ggplot (Wickham, 2016) and GGally (Schloerke et al., 2021).

5 Results

5.1 Relation between knowledge about and attitudes toward insects

To answer our first research question (RQ1) on the relation between knowledge about and attitudes toward insects, we conducted Pearson product–moment correlations between knowledge about and attitudes toward insects for the total sample and the five education levels. The results revealed a strong positive relation between knowledge and attitudes for the total sample ($r = 0.56$, $p < 0.01$) and also for Level 2 ($r = 0.53$, $p < 0.01$) and Level 3 ($r = 0.55$, $p < 0.01$) students. The results regarding Level 1 ($r = 0.34$, $p < 0.01$), Level 4 ($r = 0.42$, $p < 0.01$), and Level 5 ($r = 0.43$, $p < 0.01$) students showed a moderate positive relation. Comparisons of the correlations between the different education levels via Fisher-z-transformation did not reveal a significant difference in the strength of the relations (see Table 1; Hemmerich, 2017).

TABLE 1 Pearson product–moment correlations between knowledge about and attitudes toward insects among students with different education levels.

	Total sample (<i>N</i> = 574)	Level 1 (<i>n</i> = 82)	Level 2 (<i>n</i> = 109)	Level 3 (<i>n</i> = 171)	Level 4 (<i>n</i> = 93)	Level 5 (<i>n</i> = 119)	Comparison of the correlations			
							Level 1 and Level 2	Level 2 and Level 3	Level 3 and Level 4	Level 4 and Level 5
Knowledge and attitudes	0.56**	0.34**	0.53**	0.55**	0.42**	0.43**	<i>z</i> = −1.59	<i>z</i> = 0.23	<i>z</i> = 1.31	<i>z</i> = −0.09
							<i>p</i> = 0.112	<i>p</i> = 0.820	<i>p</i> = 0.191	<i>p</i> = 0.931

Level 1 = early lower secondary school students; Level 2 = late lower secondary school students; Level 3 = upper secondary school students; Level 4 = pre-service teachers (bachelor's program); and Level 5 = pre-service teachers (master's program). ***p* < 0.01.

5.2 Scores on knowledge about and attitudes toward insects regarding education level and gender

As knowledge and attitudes are substantially correlated variables (cf. above), we used a multi-factorial multivariate analysis of variance (two-way MANOVA) to examine the influence of education level and gender on knowledge about and attitudes toward insects (RQ2). The interaction between gender and education level was also explored. The combined effects of gender and education level on the dependent variables were statistically significant for the overall model, Wilks' Λ = 0.03; $F(2, 544) = 8617.73$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.97$, as well as for the main effect of education level, Wilks' Λ = 0.69; $F(8, 1,088) = 27.99$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.17$, and gender, Wilks' Λ = 0.97; $F(2, 544) = 8.06$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.03$, but not for the interaction effect, Wilks' Λ = 0.96; $F(8, 1,088) = 1.06$, $p = 0.392$, $\eta_p^2 = 0.01$. This indicates that there are statistically significant differences between the different education levels (level 1 to 5, see Figure 1) as well as between males and females in their combined scores of knowledge and attitudes. Therefore, we conducted post-hoc ANOVAs that revealed significant differences in education level for both knowledge, $F(4, 545) = 40.93$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.23$, and attitudes, $F(4, 545) = 34.52$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.20$ and in students' attitudes regarding gender, $F(1, 545) = 15.88$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.03$; $M_{female} = 3.27$, $SD = 0.57$, $M_{male} = 3.36$, $SD = 0.63$, but not in their knowledge, $F(1, 545) = 2.02$, $p = 0.156$; $M_{female} = 16.98$, $SD = 4.72$, $M_{male} = 16.18$, $SD = 5.04$.

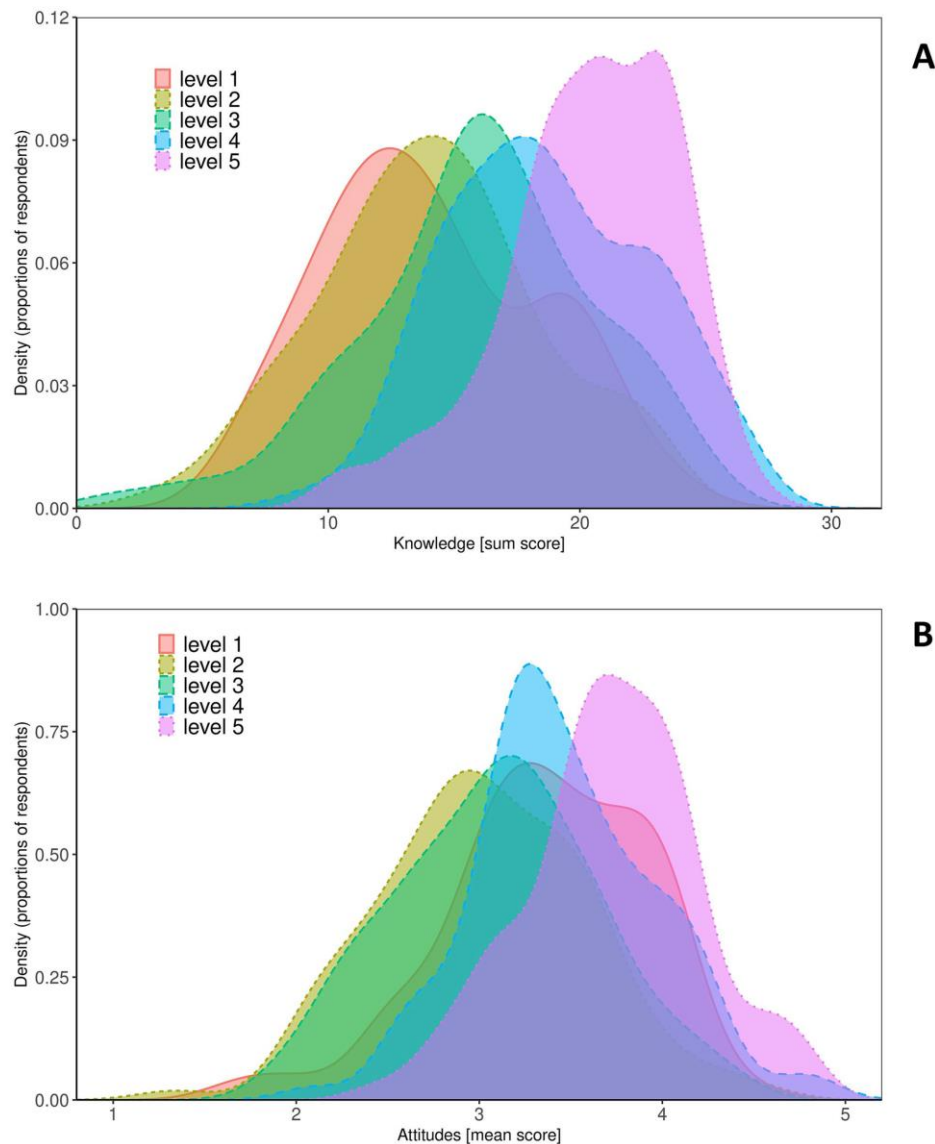


FIGURE 1

Score distribution of knowledge about and attitudes toward insects separated by education level. Visualization of distribution of knowledge (sum score; **A**) and attitudes (mean score, 5-point-Likert scale; **B**) scores. Level 1 = early lower secondary school students; Level 2 = late lower secondary school students; Level 3 = upper secondary school students; Level 4 = pre-service teachers (bachelor's program); and Level 5 = pre-service teachers (master's program).

We further investigated the differences in education level via subsequent repeated contrast analysis. The analyses exposed the knowledge that level 2 students scored lower than level 3 students, $t(547) = -3.42$, $p < 0.001$, $r = 0.20$, and the level 3 students scored lower than the level 4 students, $t(547) = -4.86$, $p < 0.001$, $r = 0.29$. There were no significant differences between level 1 students and level 2 students as well as between level 4 and level 5 students (see Table 2). The results of the subsequent repeated contrast analysis regarding the attitudes showed that level 1 students scored significantly higher than level 2 students, $t = 4.24$, $p < 0.001$, $r = -0.29$.

Furthermore, level 3 students scored significantly lower than level 4 students, $t = -6.27$, $p < 0.001$, $r = 0.32$. No significant differences were found between level 2 and level 3 students as well as between level 4 and level 5 students (see Table 2).

We also analyzed the difficulty of knowledge items on insect identification across education levels. The results of these calculations are shown in Figure 2. We used the results of the youngest students (level 1) as a reference for the assessment of item difficulty. Consequently, we distinguish between easy (item difficulty ≥ 0.8 for level 1 students), difficult (item difficulty < 0.2 for level 1 students), and moderate (item difficulty between 0.2 and 0.8 for level 1 students) items. Overall, the difficulty of most items decreases with the increase in education level. Only one item (grasshopper) shows an inconsistent pattern.

6 Discussion

6.1 Relationship between knowledge about and attitudes toward insects

Regarding our first research question, we found strong positive correlations for the total sample and the older lower and upper secondary school students (levels 2 & 3). However, there were only moderate correlations for the younger lower secondary school students (level 1) and the pre-service teachers (bachelor's and master's programs; levels 4 & 5). The comparatively weaker correlation of the younger lower secondary school students (level 1) is consistent with the findings of Hooykaas et al. (2019), who found a similar correlation for primary school students regarding species literacy and attitudes toward nature and animals. The moderate correlation among the pre-service biology teachers (bachelor's and master's program) is unexpected but could be due to the selection of the sample. The descriptive statistics show a comparatively slightly lower variance in teachers' knowledge, which could affect the strength of the correlation for these groups. However, the comparisons of the correlations between the different education levels did not show any significant differences.

6.2 Differences in knowledge about and attitudes toward insects regarding education level

The results regarding the first part of our second research question confirmed our expectation that individuals with a higher education level have a higher level of knowledge. Pre-service teachers in the bachelor's program (level 4) showed significantly higher knowledge than upper

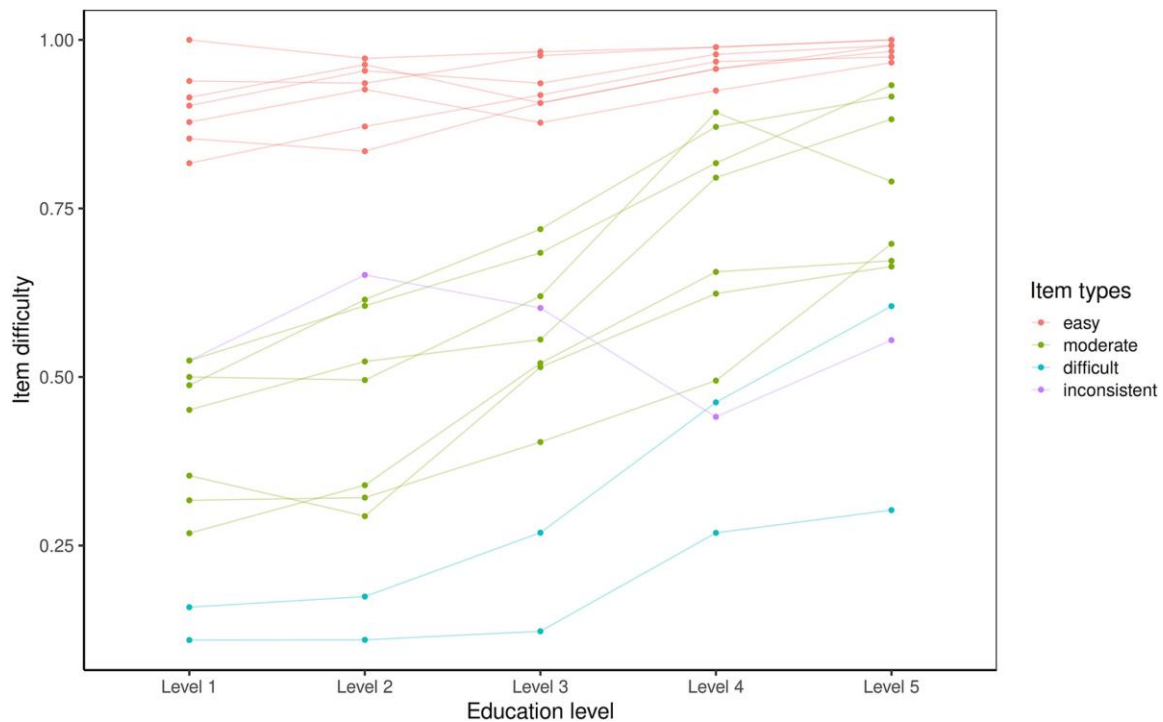
TABLE 2 Mean and standard deviations for knowledge about and attitudes toward insects and results of the contrast analyses on the differences among students with different education levels.

	Total sample					Repeated contrasts			
	Level 1 (N = 555) M (SD)	Level 2 (n = 103) M (SD)	Level 3 (n = 164) M (SD)	Level 4 (n = 91) M (SD)	Level 5 (n = 115) M (SD)	Level 1 and Level 2	Level 2 and Level 3	Level 3 and Level 4	Level 4 and Level 5
Knowledge	16.71 (4.84)	14.11 (4.32)	14.14 (4.30)	18.67 (3.95)	20.41 (3.43)	t (547) = -0.03, p = 0.976	t (547) = -3.42, p < 0.001, r = 0.20	t (547) = -4.86, p < 0.001, r = 0.29	t (547) = -1.41, p = 0.160
Attitudes	3.30 (0.59)	3.36 (0.55)	3.02 (0.57)	3.46 (0.50)	3.72 (0.47)	t (547) = 4.24, p < 0.001, r = -0.29	t (547) = -1.18, p = 0.243	t (547) = -6.27, p < 0.001, r = 0.32	t (547) = -1.10 p = 0.274

Level 1 = early lower secondary school students; Level 2 = late lower secondary school students; Level 3 = upper secondary school students; Level 4 = pre-service teachers (bachelor's program); and Level 5 = pre-service teachers (master's program).

secondary school students (level 3), and they, in turn, had higher knowledge than older lower secondary school students (level 2). These trends mirror earlier findings that indicate differences in knowledge about insect and bird species for 16 to 65-year-old participants with different education levels (Randler, 2010) and in vertebrate species for primary and secondary school students (Randler, 2008). However, no differences were found between the younger students in the lower secondary school (levels 1 & 2) or between the pre-service teachers in the bachelor's and master's programs (levels 4 & 5). The lack of differences in lower secondary school students' knowledge (levels 1 & 2) may be explained by differences in school curricula. The timing and extent to which this is addressed in lessons can, therefore, vary between schools. Additionally, conscious contact with insects has become increasingly rare in modern everyday life, potentially leading to a diminished perception of insects. A related phenomenon has been described by Wandersee and Schussler (1999) in the context of plants, introducing the concept of *plant blindness*. This term refers to the tendency of individuals to

overlook plants, lack awareness of their presence, and fail to appreciate their ecological roles (Wandersee and Schussler, 1999). The phenomenon appears to be particularly prevalent among younger generations (Blue et al., 2023). By analogy, the concept of *insect blindness* could be applied to describe younger students' diminished awareness of insects, which may result in limited knowledge about them. However, this hypothesis is challenged by findings indicating that people sometimes possess more knowledge of exotic animals than about native ones (Huxham et al., 2006). For insects, a lack of media presence may have led to relatively low levels of knowledge, as vertebrates (especially mammals) are usually used as flagship species for campaigns and are more likely to be the main characters in children's books than insects (Huxham et al., 2006; Clucas et al., 2008; Ballouard et al., 2011). An exploratory analysis of the frequency of the various insect groups in German-language media for children (item ranking; low value = less popular insect, high value = more popular insect; see Chapter S3 of the Supplementary material for the suggested ranking) using GPT-4 (see Chapter S2 of the Supplementary material for the used prompt) was correlated with the average item difficulty of insect identification items (low value = difficult item, high value = easy item). The analysis revealed a significantly strong correlation between the two variables (Spearman's $\rho = 0.583$, $p = 0.014$), indicating that items are easier (as reflected by higher item difficulty values) when the respective insects appear more frequently in children's media. This result suggests that a greater presence of insects in media is associated with easier identification. In order to draw more reliable conclusions, this initial assessment should be further investigated in future studies using appropriate methods, such as those used in bird studies (Randler et al., 2024).

**FIGURE 2**

Item difficulty of insect identification items. Level 1 = early lower secondary school students; Level 2 = late lower secondary school students; Level 3 = upper secondary school students; Level 4 = pre-service teachers (bachelor's program); and Level 5 = pre-service teachers (master's program). The item types were determined based on the calculated item difficulty for level 1 resulting in the categories easy (item difficulty >0.8), moderate (item difficulty <0.8), difficult (item difficulty <0.2) and inconsistent progression (item difficulty increases from level 2). Based on this classification, the results shown in the figure are in the following order of insects from top to bottom: ant, dragonfly, wasp., moth, bee, ladybug, housefly (easy items), grasshopper (inconsistent item), stick insect, cockchafer, praying mantis, bug, cockroach, flea, louse (moderate items), hercules beetle, and longhorned beetle (difficult items).

Similar to the trend in knowledge about insects, attitudes toward insects were more positive at higher education levels, with a clear difference between upper secondary school students (level 3) and pre-service teachers in the bachelor's program (level 4). Only the younger lower secondary school students (level 1) deviate from this trend, showing significantly more positive attitudes than the older lower secondary school students (level 2). The more positive attitudes of the pre-service biology teachers (bachelor's and master's program) confirm the findings of Kellert (1993), who found that scientists with a biological focus had more positive attitudes regarding invertebrates than other groups and the general population.

In addition, pre-service teachers may have had more exposure to insects and their ecological and societal importance during their biology teacher education. Kellert (1993) also describes that negative attitudes regarding invertebrates, such as fear, increase with age, which might explain the less positive attitudes for the older lower and upper secondary school students (level 2 & 3) compared to the younger lower secondary school students (level 1).

6.3 Gender differences in attitudes toward insects but not in knowledge about insects

Concerning our second research question, we did not find gender-specific differences in knowledge about insects. These findings are in contrast to previous studies regarding knowledge about invertebrates, which identified a higher level of knowledge in males (Kellert and Berry, 1987; Huxham et al., 2006). However, these differences seem to be disappearing as Hooykaas et al. (2019) found no gender-specific differences in elementary school students but from the age of 12 onwards, and explain this discrepancy with adapting socialization processes between boys and girls.

Male students showed slightly more positive attitudes toward insects. This result follows on from previous findings that indicate that males have more positive attitudes toward animals that are less popular, dangerous, or often perceived as disgusting than female persons (e.g., Bjerke and Østdahl, 2004; Prokop et al., 2008b; Prokop and Tunnicliffe, 2008). It was also assumed that females may be more likely to develop anxiety toward invertebrates (Kellert, 1993). Our findings extend the current state of research by providing more recent results. The small effect sizes suggest that gender differences have diminished in recent generations. Gender-specific education with regard to attitudes toward insects, therefore, seems to have lost much of its relevance for recent generations in Germany.

7 Limitations

When interpreting the results, the exploratory character of this study must be considered. In some analyses, the sample sizes of the subsamples differed considerably when analyzing the additional variables. To avoid falsifying the results through guesswork and thus obtain a reliable measuring instrument, the questionnaire of Lucky et al. (in review, see footnote 1), was adapted to the cognitive abilities (e.g., knowledge about technical terms like endosymbiont) of the students (especially younger lower secondary school students). Also, the attitude scale was adapted and supplemented with additional items to cover a broader range of attitudes (e.g., behavioral dimension). Therefore, the results are only partially comparable with the original study (see chapter Methods for more details on questionnaire adjustments). The aim of this study was to analyze a comprehensive framework of attitudes toward insects with a particular focus on pre-service biology teachers. We intended to cover as many attitude-related aspects as possible that are relevant to pre-service teachers' future teaching practice. To this end, we developed an extended attitudinal model that contains both species-related dimensions

(naturalistic, ecoscientistic, and negativistic) as well as cognitive, affective, and behavioral components.

8 Conclusions and implications for education and research

This study aimed to assess the status quo of pre-service biology teachers' knowledge about and attitudes toward insects compared to secondary school students in Germany. We especially wanted to determine whether the biology training of pre-service teachers at university increases knowledge and attitudes as part of their preparation for the teaching profession. This initial assessment indicates a good preparation of pre-service teachers' subject matter knowledge and relatively positive attitudes toward insects. From a scientific point of view, it would therefore be interesting to investigate teachers' intentions to address insects in the classroom (e.g., based on the theory of planned behavior; Ajzen, 1991) – especially as insects are rarely mentioned directly in curricula. The rather positive attitudes of pre-service teachers in our study give a first hint that pre-service teachers might be more likely to implement insect-related content in their biology class (Wagler, 2010; Büssing et al., 2019). A study of pre-service teachers' intentions to implement wolf-related content in their future biology classes, based on the theory of planned behavior, found that attitudes toward wolves were predictive of the pre-service teachers' motivation to protect wolves (Büssing et al., 2019). They also indicate that this motivation is predictive of the attitude of teaching and the perceived behavior control. These findings might be transferred to insects, as wolves are also often seen as controversial (e.g., as a threat to humans) and tend to evoke negative attitudes. Against the background of species extinction and the increasing importance of species conservation, it would therefore be valuable to analyze the motivation to protect insects as an additional construct in future studies. As secondary school students showed rather moderate results in both knowledge about and attitudes toward insects, it is essential to provide pre-service teachers with the skills to teach relevant but unpopular topics (such as insects in the ecosystems) in a way that is conducive to learning. With regard to teacher education, we hope that our results will encourage teacher educators and pre-service teachers to consider unpopular topics (such as insects) in their studies, not only from a scientific point of view but also from a didactic (biology education) perspective.

It was also intended to investigate whether education level or gender proves to be beneficial or detrimental regarding knowledge about and attitudes toward insects. Our study showed the effects of education level on knowledge and attitudes. It also confirms the relation between knowledge about and attitudes toward insects. Gender did not affect knowledge and only had little impact on attitudes. This result indicates that the differences in the socialization process

of students of different genders have diminished. However, since this aspect was not the focus of this study, it is only an indication that it should be more precisely classified by considering other personal factors. The relationship between knowledge and attitudes and the effect of the education level should be considered in the teaching of biology in schools. Kellert (1985) already pointed out three stages in the development of the perception of animals. These stages develop from a more emotional interest in animals (up to grade 5), through the development of a cognitive and factual understanding of animals, to the final stage (from grade 8), where ethical and ecological aspects become more important. These stages refer to both a cognitive (knowledge) and an affective (attitudes) development process in school students. Therefore, school students are receptive to different aspects of animal groups and their significance depending on their stage of development.

In order to teach complex biological topics in an age-appropriate way, this aspect should be considered by the teacher and underlines that multifaceted teacher training is essential. In this context, our study provides a good indication of helpful subject matter knowledge in pre-service teacher training, which should be followed by further research on subject-specific didactic implementation (here regarding insects) in the future.

Data availability statement

The datasets presented in this study can be found in online repositories. The names of the repository/repositories and accession number(s) can be found at: <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/W2ZDS>.

Ethics statement

The studies involving humans were approved by University of Florida IRB (IRB202002790), Charles University, Faculty of Science (2020/22), Ethics Commission of Bielefeld University on application no. 2021-198 of August 23, 2021, Matej Bél University, nr. 1561/2021. The studies were conducted in accordance with the local legislation and institutional requirements. Written informed consent for participation in this study was provided by the participants' legal guardians/next of kin.

Author contributions

RG: Data curation, Formal analysis, Investigation, Writing – original draft, Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing. PN: Conceptualization, Formal analysis, Visualization, Writing – review & editing, Methodology. VJ: Conceptualization, Writing – review &

editing, Methodology. JG: Conceptualization, Supervision, Writing – review & editing, Methodology.

Funding

The author(s) declare that no financial support was received for the research, authorship, and/or publication of this article.

Acknowledgments

We would like to thank all the secondary school and university students for participating in our study and the secondary school teachers for the time provided during class.

Conflict of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's note

All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

Supplementary material

The Supplementary material for this article can be found online at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feduc.2024.1477841/full#supplementary-material>

References

- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organ. Behav. Hum. Decis. Process.* 50, 179–211. doi: 10.1016/0749-5978(91)90020-T
- Aptyka, H., and Großschedl, J. (2022). Analyzing pre-service biology teachers' intention to teach evolution using the theory of planned behavior. *Evol.: Educ. Outreach* 15:16. doi: 10.1186/s12052-022-00175-1
- Backman, E., Pearson, P., and Forrest, G. J. (2019). The value of movement content knowledge in the training of Australian PE teachers: perceptions of teacher educators. *Curric. Stud. Health Phys. Educ.* 10, 187–203. doi: 10.1080/25742981.2019.1596749
- Ballouard, J.-M., Brischoux, F., and Bonnet, X. (2011). Children prioritize virtual exotic biodiversity over local biodiversity. *PLoS One* 6:e23152. doi: 10.1371/journal.pone.0023152
- Bjerke, T., and Østdahl, T. (2004). Animal-related attitudes and activities in an urban population. *Anthrozoös* 17, 109–129. doi: 10.2752/089279304786991783

- Blue, S., Hargiss, C. L. M., Norland, J., Dekeyser, E. S., and Comeau, P. (2023). Plant blindness represents the loss of generational knowledge and cultural identity. *Nat. Sci. Educ.* 52:e20106. doi: 10.1002/nse2.20106
- Büssing, A. G., Schleper, M., and Menzel, S. (2019). Do pre-service teachers dance with wolves? Subject-specific teacher professional development in a recent biodiversity conservation issue. *Sustain. For.* 11:47. doi: 10.3390/su11010047
- Campbell, N. A., Kratochwil, A., Lazar, T., and Reece, J. B. (2009). *Biologie [Biology]*. Germany: Pearson Studium.
- Clucas, B., McHugh, K., and Caro, T. (2008). Flagship species on covers of US conservation and nature magazines. *Biodivers. Conserv.* 17, 1517–1528. doi: 10.1007/s10531-008-9361-0
- European Food Safety Authority Ippolito, A., Aguila, M. D., Aiassa, E., Guajardo, I. M., Neri, F. M., et al. (2020). Review of the evidence on bee background mortality. *EFSA* 17:1880E. doi: 10.2903/sp.efsa.2020.EN-1880
- Eurydice (2021). National specificities of the education system. Available at: . (https://eacea.ec.europa.eu/national-policies/eurydice/content/germany_en).
- Genovart, M., Tavecchia, G., Enseñat, J. J., and Laiolo, P. (2013). Holding up a mirror to the society: children recognize exotic species much more than local ones. *Biol. Conserv.* 159, 484–489. doi: 10.1016/j.biocon.2012.10.028
- Großschedl, J., Welter, V., and Harms, U. (2019). A new instrument for measuring pre-service biology teachers' pedagogical content knowledge: the PCK-IBI. *J. Res. Sci. Teach.* 56, 402–439. doi: 10.1002/tea.21482
- Haddock, G., and Maio, G. R. (2014). “Einstellungen [Attitudes]” in *Sozialpsychologie*. eds. K. Jonas, W. Stroebe and M. Hewstone (Berlin, Heidelberg: Springer), 197–229.
- Härtel, T., Randler, C., and Baur, A. (2023). Using species knowledge to promote pro-environmental attitudes? The association among species knowledge, environmental system knowledge and attitude towards the environment in secondary school students. *Animals* 13:972. doi: 10.3390/ani13060972
- Hemmerich, W. (2017). StatistikGuru: Korrelationen statistisch vergleichen [StatistikGuru: Compare correlations statistically]. Available at: . (<https://statistikguru.de/rechner/korrelationen-vergleichen.html>).
- Hines, J. M., Hungerford, H. R., and Tomera, A. N. (1987). Analysis and synthesis of research on responsible environmental behavior: a meta-analysis. *J. Environ. Educ.* 18, 1–8. doi: 10.1080/00958964.1987.9943482
- Hooykaas, M. J. D., Schilthuizen, M., Aten, C., Hemelaar, E. M., Albers, C. J., and Smeets, I. (2019). Identification skills in biodiversity professionals and laypeople: a gap in species literacy. *Biol. Conserv.* 238:108202. doi: 10.1016/j.biocon.2019.108202
- Huxham, M., Welsh, A., Berry, A., and Templeton, S. (2006). Factors influencing primary school children's knowledge of wildlife. *J. Biol. Educ.* 41, 9–12. doi: 10.1080/00219266.2006.9656050
- Kellert, S. R. (1985). “Attitudes toward animals: age-related development among children” in *Advances in animal welfare science 1984*. eds. M. W. Fox and L. D. Mickley (Dordrecht: Springer), 43–60.

- Kellert, S. R. (1993). Values and perceptions of invertebrates. *Conserv. Biol.* 7, 845–855. doi: 10.1046/j.1523-1739.1993.740845.x
- Kellert, S. R., and Berry, J. K. (1987). Attitudes, knowledge, and behaviors toward wildlife as affected by gender. *Wildl. Soc. Bull.* 15, 363–371.
- Konnemann, C., Asshoff, R., and Hammann, M. (2012). Einstellungen zur Evolutionstheorie: Theoretische und messtheoretische Klärungen. *Zeitsch. Didak. Naturwis.* 18, 55–79. doi: 10.25656/01:31738
- Lindemann-Matthies, P. (2005). ‘Loveable’ mammals and ‘lifeless’ plants: how children’s interest in common local organisms can be enhanced through observation of nature. *Int. J. Sci. Educ.* 27, 655–677. doi: 10.1080/09500690500038116
- Menzel, S. (2010). Biologische Ressourcen als Lebensgrundlage für alle - Biodiversität als Kontext des Globalen Lernens im Biologieunterricht [biological resources as the basis of life for all - biodiversity as a context for global learning in biology lessons]. *Zeitsch. Internat. Bild. Sch. Entwicklung.* 33, 10–15. doi: 10.25656/01:9603
- Menzel, S., and Bögeholz, S. (2006). Vorstellungen und Argumentationsstrukturen von Schüler(inne)n der elften Jahrgangsstufe zur Biodiversität, deren Gefährdung und Erhaltung [Ideas and argumentation structures of eleventh grade students on biodiversity, its endangerment and conservation]. *Zeitsch. Didak. Naturwis.* 12, 199–217. doi: 10.25656/01:31628
- Patel, V., Pauli, N., Biggs, E., Barbour, L., and Boruff, B. (2021). Why bees are critical for achieving sustainable development. *Ambio* 50, 49–59. doi: 10.1007/s13280-020-01333-9
- Prokop, P., Kubiato, M., and Fančovičová, J. (2008a). Slovakian pupils’ knowledge of, and attitudes toward, birds. *Anthrozoös* 21, 221–235. doi: 10.2752/175303708X332035
- Prokop, P., Prokop, M., and Tunnicliffe, S. (2008b). Effects of keeping animals as pets on children’s concepts of vertebrates and invertebrates. *Int. J. Sci. Educ.* 30, 431–449. doi: 10.1080/09500690701206686
- Prokop, P., and Tunnicliffe, S. D. (2008). “Disgusting” animals: primary school children’s attitudes and myths of bats and spiders. *Eurasia J. Math. Sci. Tech. Ed.* 4, 87–97. doi: 10.12973/ejmste/75309
- Prokop, P., and Tunnicliffe, S. (2010). Effects of having pets at home on children’s attitudes toward popular and unpopular animals. *Anthrozoös* 23, 21–35. doi: 10.2752/175303710X12627079939107
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R foundation for statistical computing.
- Randler, C. (2008). Pupils’ factual knowledge about vertebrate species. *J. Balt. Sci. Educ.* 7, 48–54.
- Randler, C. (2010). Animal related activities as determinants of species knowledge. *Eurasia J. Math. Sci. Tech. Ed.* 6, 237–243. doi: 10.12973/ejmste/75244
- Randler, C., Härtel, T., Vanhöfen, J., Großschedl, J., Götzelmann, L., Koch, S., et al. (2024). Human dimensions, instead of ecological traits, explain the familiarity of bird species in the general public. [Unpublished manuscript]. Faculty of Science, Department of Biology, University of Tübingen.

- Randler, C., and Wieland, L. (2010). Knowledge about common vertebrate species in German kindergarten pupils. *J. Balt. Sci. Educ.* 9, 135–141.
- Schlegel, J., and Rupf, R. (2010). Attitudes towards potential animal flagship species in nature conservation: a survey among students of different educational institutions. *J. Nat. Conserv.* 18, 278–290. doi: 10.1016/j.jnc.2009.12.002
- Schloerke, B., Cook, D., Larmarange, J., Briatte, F., Marbach, M., Thoen, E., et al. (2021). "_GGally: Extension to 'ggplot2'_. R package version 2.1.2". Available at: <https://github.com/ggobi/ggally>, <https://ggobi.github.io/ggally/> (Accessed May 12, 2024).
- Silva, A., and Minor, E. S. (2017). Adolescents' experience and knowledge of, and attitudes toward, bees: implications and recommendations for conservation. *Anthrozoös* 30, 19–32. doi: 10.1080/08927936.2017.1270587
- Siviter, H., Bailes, E. J., Martin, C. D., Oliver, T. R., Koricheva, J., Leadbeater, E., et al. (2021). Agrochemicals interact synergistically to increase bee mortality. *Nature* 596, 389–392. doi: 10.1038/s41586-021-03787-7
- Vanderstock, A., Grandi-Nagashiro, C., Kudo, G., Latty, T., Nakamura, S., White, T. E., et al. (2022). For the love of insects: gardening grows positive emotions (biophilia) towards invertebrates. *J. Insect Conserv.* 26, 751–762. doi: 10.1007/s10841-022-00419-x
- Wagler, R. (2010). The association between preservice elementary teacher animal attitudes and likelihood of animal incorporation in future science curriculum. *Int. J. Environ. Sci. Educ.* 5, 353–375.
- Wagler, R. R., and Wagler, A. E. (2015). Assessing the attitudes and beliefs of preservice middle school science teachers toward biologically diverse animals. *Int. J. Environ. Sci. Educ.* 10, 271–286. doi: 10.12973/ijese.2015.245a
- Wandersee, J. H., and Schussler, E. E. (1999). Preventing plant blindness. *Am. Biol. Teach.* 61, 82–86. doi: 10.2307/4450624
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. New York: Springer-Verlag.
- WWF (2018). *Living planet report –2018: Aiming higher*. Gland, Switzerland: WWF.

6 Gesamtdiskussion

Unterrichten in heterogenen Lerngruppen stellt Lehrende vor vielfältige Herausforderungen und kann zu einer Überforderung von Lehrkräften führen (Jude et al., 2024). Können Lehrkräfte diesen Anforderungen nicht nachkommen, kann dies wiederum zur Benachteiligung von Schüler:innen führen. Um den Bedürfnissen der Lernenden gerecht zu werden, ist zunächst eine Kenntnis über mögliche lernrelevante Faktoren essenziell. Diese Dissertation hatte daher zum Ziel personenbezogene Variablen zu identifizieren, die für das evolutionsbezogene Wissen potenziell von Bedeutung sind, und zu untersuchen wie der Wissenserwerb in diesem Themenbereich durch den Einsatz verschiedener Instruktionsstrategien gefördert werden kann (siehe Abbildung 2). Hierfür wurden in der ersten Studie das evolutionsbezogene Wissen von Lernenden in der Sekundarstufe II, einschließlich der Verwendung von Schlüsselkonzepten und fachlich inadäquaten Konzepten, sowie ihre Akzeptanz der Evolution, ihre Religiosität und Konfession untersucht. Die zweite Studie widmete sich dem Vergleich der Wirksamkeit verschiedener Instruktionsstrategien hinsichtlich des evolutionsbezogenen Wissenserwerbs von Schüler:innen der gleichen Sekundarstufe, wenn diese optional zur Verfügung gestellt wurden. Auch hier wurden personenbezogene Variablen in den Analysen berücksichtigt. Diese umfassten das Vorwissen, die Selbstwirksamkeitserwartungen der Lernenden hinsichtlich des Fachs Biologie im Allgemeinen und in Bezug auf phylogenetische Stammbäume sowie ihre intrinsische Motivation. Zudem wurden explorativ die Gründe für die (Nicht-)Nutzung der optionalen Lernhilfen untersucht. Ergänzt wurden diese beiden Studien durch eine dritte Studie, die die Bedeutung der personenbezogenen Variablen von Lernenden in einem weiteren Kontext zum Thema Insekten untersuchte. In Anlehnung an die erste Studie lag auch hier der Fokus auf der Analyse des themenbezogenen Wissens und den entsprechenden Einstellungen. Der Blick auf diese beiden Variablen wurde durch die Berücksichtigung des Bildungsstandes und des Geschlechts der Teilnehmenden erweitert. Die Diskussion der Einzelbefunde sind in der Publikation der jeweiligen Studie zu finden. Im Folgenden wird daher ein Fokus auf eine Einordnung der Ergebnisse in den Gesamtzusammenhang dieser Dissertation gelegt.

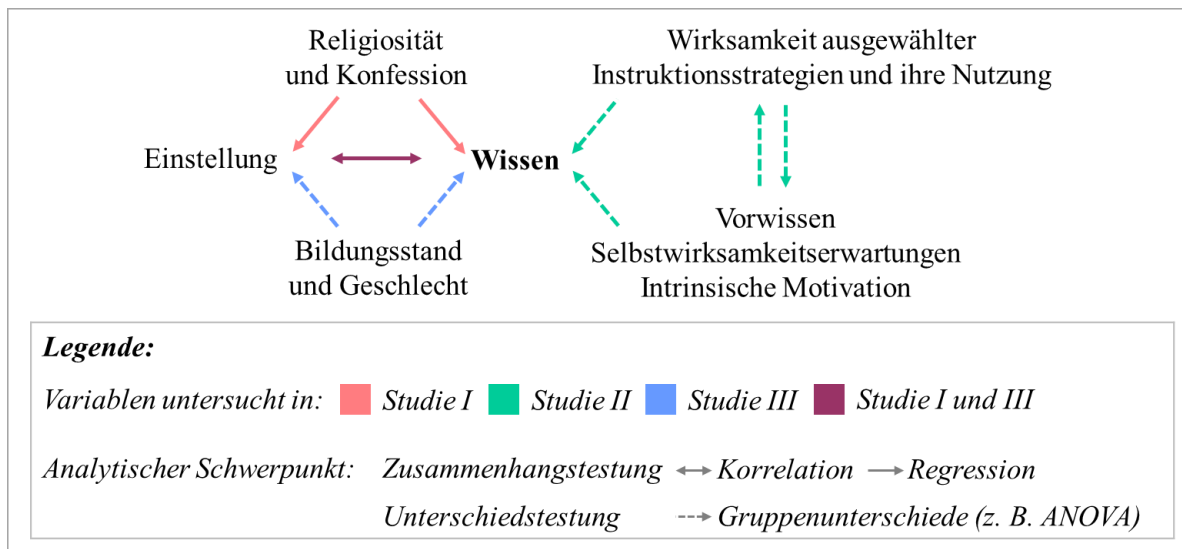


Abbildung 2. Übersicht über die untersuchten personenbezogenen Variablen und die analysierten potenziellen Beziehungen (eigene Darstellung).

6.1 Die Bedeutung personenbezogener Variablen für das evolutionsbezogene Wissen

Ein Schwerpunkt dieser Dissertation lag auf der Untersuchung personenbezogener Lernendenvariablen, die in Hinblick auf verschiedene biologische Sachverhalte (z. B. Evolution in Studie I, Insekten in Studie III) potenziell für heterogene Lernendenvoraussetzungen sorgen können. Hierzu wurde das themenbezogene Wissen bei verschiedenen Gruppen (z. B. unterschiedliche konfessionelle Gruppen³ in Studie I, unterschiedliche Bildungsstände und Geschlechter in Studie III) verglichen. Die Untersuchung personenbezogener Variablen mit Bezug zur religiösen Identität stellt einen sensiblen Forschungsinhalt dar. Diese Arbeit zielt darauf ab, einen Beitrag dazu zu leisten, schulisches Lernen gerechter zu gestalten, indem am Beispiel der Evolutionstheorie für die Bedeutung kultureller (hier religiöser) Vielfalt im Biologieunterricht sensibilisiert wird. Die im Folgenden diskutierten Ergebnisse sind daher von negativen Zuschreibungen durch Fehlinterpretationen, wie die Verfestigung von Vorurteilen, klar abzugrenzen.

Hinsichtlich des allgemeinen evolutionsbezogenen Wissens wurde in **Studie I** ein eher gering ausgeprägtes Wissen festgestellt, das mit Ergebnissen bisheriger Studien übereinstimmt (Beniermann et al., 2021; Kuschmierz, Beniermann, et al., 2020) und weiteres Potenzial zur Optimierung für die schulische Bildung in Hinblick auf das Thema Evolution aufzeigt. Es hat sich herausgestellt, dass die Verwendung von fachlich inadäquaten Konzepten zur Erklärung evolutionärer Entwicklungen deskriptiv zwar geringer ausfällt als die Verwendung von

³ Im Folgenden wird mit der Bezeichnung *konfessionelle Gruppen* die Unterscheidung zwischen Proband:innen, die sich als katholisch, evangelisch, einer muslimischen (z. B. sunnitisch) oder keiner (konfessionslos) religiösen Glaubensrichtung zugehörig fühlen, verstanden.

Schlüsselkonzepten, jedoch können diese auch innerhalb einer Erklärung gemeinsam auftreten (z. B. Aptyka et al., 2022; Evans, 2001; Opfer et al., 2012).

Im deskriptiven Vergleich der Wissensscores von Schüler:innen verschiedener konfessioneller Gruppen zeigte sich, dass konfessionslose Schüler:innen über das höchste allgemeine evolutionsbezogene Wissen verfügten, während dieses bei Schüler:innen einer muslimischen Glaubensrichtung am geringsten ausgeprägt war. Gleichzeitig fiel lediglich der Unterschied zwischen konfessionslosen Schüler:innen und Schüler:innen einer muslimischen Glaubensrichtung signifikant aus. Vergleiche mit und zwischen katholischen und evangelischen Schüler:innen waren nicht signifikant. Ergänzend ließ sich in **Studie III** ein eher hohes insektenbezogenes Wissen feststellen, das mit steigendem Bildungsstand zunahm. Diese Befunde könnten einen Hinweis darauf liefern, dass nicht die Zugehörigkeit zu einer konfessionellen Gruppe die ausschlaggebende Variable für die Ausprägung des Wissensscores in **Studie I** ist, sondern diese nur als Marker für verschiedene Gruppen dienen könnte, die unterschiedlichen Bedingungen im Schulsystem ausgesetzt sind. So zeigen demographische Erhebungen zur Zusammensetzung der deutschen Bevölkerung beispielsweise, dass muslimische Personen in der Regel einen Migrationshintergrund haben, der eine eigene Zuwanderungsgeschichte oder die von Bezugspersonen (zum Beispiel der Eltern) beinhalten kann (Bundesamt für Migration und Flüchtlinge, 2020). Diese Bedingungen können zu einem erschwerten Zugang zu Bildungsinhalten beispielsweise aufgrund von unzureichender Förderung (z. B. hinsichtlich sprachlicher Kompetenzen) führen, die sich in geringerem Fachwissen widerspiegeln können (Heinze et al., 2007).

Des Weiteren weisen die deskriptiv vergleichsweise geringeren Scores in der Verwendung von Schlüsselkonzepten und fachlich inadäquaten Konzepten bei Schüler:innen muslimischer Glaubensrichtungen in **Studie I** auf eine geringere Textlänge bei den Freitextitems hin. Gleichzeitig gibt es für die signifikant geringere Nutzung einzelner Schlüsselkonzepte (z. B. Schlüsselkonzept *limitierte Ressourcen*) keine plausible Erklärung, die sich auf die Zugehörigkeit zu einer konfessionellen Gruppe und den damit verbundenen religiösen Weltanschauungen zurückführen lassen. Auch wurden keine Hinweise darauf gefunden, dass Schüler:innen einer muslimischen Glaubensrichtung zu mehr fachlich inadäquaten Vorstellungen neigten als die Schüler:innen anderer konfessioneller Gruppen, da sich diese nicht signifikant in ihrer Verwendung von den anderen konfessionellen Gruppen unterschieden. Vor diesem Hintergrund sind weitere Gründe wie eine sinkende Anstrengung im Testverlauf ebenfalls denkbar (Borghans et al., 2024).

Darüber hinaus zeigte sich, dass die Zugehörigkeit zu einer muslimischen Glaubensrichtung zwar in geringem Maße prädiktiv für das allgemeine evolutionsbezogene Wissen, nicht jedoch für die Akzeptanz der Evolution war. Auch die Religiosität einer Person erwies sich nicht als prädiktiv für das evolutionsbezogene Wissen. Auf der Grundlage dieser Befunde ist zu vermuten, dass weitere bisher nicht identifizierte Variablen in den Ergebnissen zum evolutionsbezogenen Wissen zum Tragen kommen könnten, die nicht in religionsbezogenen Variablen begründet sind.

Neben dem Wissen über biologische Sachverhalte wurden im Rahmen dieser Dissertation auch die Einstellungen zu diesen Sachverhalten untersucht. In **Studie I** konnte eine hohe Akzeptanz (positive Einstellungsausprägung) der Evolution festgestellt werden. Auch hier zeigten die konfessionslosen Schüler:innen die höchste Ausprägung. Die Akzeptanzscores von Schüler:innen muslimischer Glaubensrichtungen fielen ebenfalls am geringsten aus und unterschieden sich signifikant von den Akzeptanzscores konfessionsloser und evangelischer Schüler:innen. Dennoch wiesen die Akzeptanzscores der Schüler:innen muslimischer Glaubensrichtungen auf eine eher zustimmende als ablehnende Einstellung hin. Da die Akzeptanz der Evolution häufig in negativem Zusammenhang mit der Religiosität einer Person steht (siehe Kapitel 2.3), wurde die Religiosität der Schüler:innen ebenfalls berücksichtigt. Hierbei ergaben sich zwischen Schüler:innen aller konfessionellen Gruppen signifikante Unterschiede. Eine Ausnahme stellten die katholischen und evangelischen Schüler:innen dar. Schüler:innen dieser beiden Gruppen wiesen ähnliche Religiositätsscores auf, die zwischen denen der Schüler:innen muslimischer Glaubensrichtungen (höchste Ausprägung) und denen der konfessionslosen Schüler:innen (geringste Ausprägung) lagen. Diese Ergebnisse stimmen mit bisherigen Ergebnissen zu Schüler:innen aus Deutschland überein (Beniermann, 2019; Lammert, 2012) und spiegeln generelle Befunde zu schwindenden konfessionellen Unterschieden (z. B. hinsichtlich der Religiosität) zwischen katholischen und evangelischen Personen in Deutschland wider (Evangelische Kirche in Deutschland, 2023). Gleichzeitig stellte sich zwar die Religiosität als prädiktiv für die Akzeptanz der Evolution heraus, jedoch nicht die Zugehörigkeit zu einer konfessionellen Gruppe. Dies könnte einen Hinweis darauf geben, dass die Akzeptanz der Evolution nicht von der Art der konfessionellen Gruppe, sondern von der Stärke der religiösen Überzeugung beziehungsweise Religiosität bestimmt wird (Huber, 2008). So konnte Lammert (2012) für Schüler:innen am Ende der Sekundarstufe I bereits signifikante Unterschiede zwischen stark gläubigen (moderate Akzeptanz der Evolution) und glaubensfreien (hohe Akzeptanz der Evolution) Schüler:innen feststellen.

Weiterhin könnte wie in Kapitel 2.3 beschrieben ein möglicher wahrgenommener Konflikt zwischen den Annahmen der Evolutionstheorie und religiösen Vorstellungen die Akzeptanz der Evolution mindern (Barnes, Dunlop, et al., 2020; Barnes et al., 2021). Zudem kann eine nähere Betrachtung der eingesetzten Items zur Messung der Akzeptanz der Evolution durch das Testinstrument ATEVO 2.0 (Beniermann, 2019) auf eine Einschränkung der Interpretierbarkeit dieser Skala hinweisen, die sich auch in der eher gering ausgeprägten Reliabilität der Skala widerspiegeln kann. So wird in einem Item beispielsweise nach der Zustimmung zu der Annahme gefragt, dass „unser Moralempfinden zum Teil das Ergebnis natürlicher Evolution ist“ (Beniermann, 2019). Legt man nun die Argumentation der nicht-überlappenden Magisterien zugrunde, bei der die Wissenschaft den Bereich der Empirie und die Religion den Bereich der Moral umfassen (Gould, 1997), ist die Aussagekraft dieses Items hinsichtlich der tatsächlichen Akzeptanz der Evolution, im Vergleich zu anderen Items der Skala (z. B. dass „die heutigen Lebewesen das Ergebnis evolutionärer Prozesse sind, die über Milliarden von Jahren stattgefunden haben“; Beniermann, 2019), möglicherweise eingeschränkt. Niedrigere Scores in diesem Item könnten sich somit auf das Ergebnis der Gesamtskala zur Erfassung der Akzeptanz der Evolution auswirken und dadurch bei religiösen Personen zu einem geringeren Gesamtakzeptanzscore führen als bei nicht-religiösen Personen. Ähnlich argumentieren Barnes et al. (2024) und beanstanden, dass Begriffe wie Moral und Bewusstsein in dem gleichen Instrument zweideutig sind und aus einer religiösen Perspektive anders gedeutet werden. Dadurch, so die Autor:innen, könnten diese Items implizit dazu auffordern, sich für eine religiöse oder naturwissenschaftliche Interpretation entscheiden zu müssen. Zudem kritisieren sie, dass zur Beantwortung solcher Items ein Verständnis über Psychologie und Humanevolution notwendig ist. Aus diesen Überlegungen leiten sie ab, dass das Instrument möglicherweise nicht für den Einsatz in allgemeinen Biologiekursen oder für stark religiöse Personen geeignet ist (Barnes et al., 2024).

In **Studie I** dieser Dissertation wurden schwach bis moderat positive Zusammenhänge zwischen der Akzeptanz der Evolution und dem allgemeinen evolutionsbezogenen Wissen sowie der Verwendung von Schlüsselkonzepten festgestellt. Anders als bei den angehenden Biologielehrkräften in der Studie von Großschedl et al. (2018) zeigte sich hinsichtlich der Verwendung von fachlich inadäquaten Konzepten und der Akzeptanz der Evolution jedoch kein signifikanter Zusammenhang. Die Ergebnisse hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen dem evolutionsbezogenen Wissen und der Akzeptanz der Evolution sind im Einklang mit bisheriger Forschung, die für jüngere Lernende tendenziell eher schwache Zusammenhänge feststellten (Beniermann, 2019; Fenner, 2013; Lammert, 2012). Für ältere Personen mit höherem

Bildungsstand (z. B. Biologielehramtsstudierende) hingegen, konnten stärkere Zusammenhänge festgestellt werden (z. B. Großschedl et al., 2018; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020).

Die Betrachtung der einzelnen konfessionellen Gruppen hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen dem evolutionsbezogenen Wissen und der Akzeptanz der Evolution ergab lediglich für evangelische Schüler:innen einen signifikanten starken Zusammenhang. Für alle anderen konfessionellen Gruppen konnte kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Es wird angenommen, dass die religiöse Entwicklung einer Person in Stufen verläuft (Fowler & Dell, 2006), weshalb neben dem evolutionsbezogenen auch das religionsbezogene Wissen der Schüler:innen weniger stark ausgeprägt sein könnte. Sowohl ein geringeres religions- als auch evolutionsbezogenes Wissen könnte dazu führen, dass sich widersprechende Annahmen nicht bekannt sind oder nicht wahrgenommen werden. Der weniger stark ausgeprägte Zusammenhang zwischen dem Wissen und der Akzeptanz in der Gesamtstichprobe sowie ausbleibende Effekte hinsichtlich der Unterscheidung der konfessionellen Gruppen könnten daher in einem geringen Wissen in diesen Bereichen begründet sein.

Die Ergebnisse aus **Studie III** weisen darauf hin, dass sich die Tendenzen zum Bildungsstand möglicherweise auch auf andere biologiebezogene Kontexte übertragen lassen. Ähnlich zum Wissen fielen, die Einstellungen gegenüber Insekten mit zunehmendem Bildungsstand positiver aus. Lediglich die Ergebnisse von Schüler:innen der Erprobungsstufe wichen von diesem Trend ab, da sie positivere Einstellungen gegenüber Insekten zeigten als Schüler:innen, die sich bereits am Ende der Sekundarstufe I befanden. Darüber hinaus konnte deskriptiv eine zunehmende Stärke des Zusammenhangs zwischen dem insektenbezogenen Wissen und der Einstellung innerhalb der Sekundarstufen I und II festgestellt werden, deren Unterschiede jedoch nicht signifikant waren. Schüler:innen in der Erprobungsstufe wiesen dabei einen schwach bis moderat positiven Zusammenhang auf, während sich dieser bei Schüler:innen am Ende der Sekundarstufe I und in der Sekundarstufe II als stark positiv zeigte. Gleichzeitig konnte im deskriptiven Vergleich bei angehenden Lehrkräften nur noch ein moderat bis stark positiver Zusammenhang festgestellt werden. Die Ergebnisse hinsichtlich der Biologielehramtsstudierenden ergänzen ältere Studienergebnisse, die zeigten, dass insbesondere Biologiestudierende über hohes umweltbezogenes Wissen und hohe umweltbezogene Einstellungen verfügten (Tikka et al., 2000). Die hohen Werte in beiden Variablen der angehenden Biologielehrkräfte könnten auf einen Deckeneffekt hindeuten. Die damit verbundene vergleichsweise geringere Varianz könnte eine Erklärung für den geringer ausgeprägten Zusammenhang in dieser Gruppe liefern (Döring et al., 2016).

Ergänzend wurden in Studie III potenzielle geschlechterbezogene Unterschiede untersucht. Der ausbleibende geschlechterbezogene Unterschied im Wissen bestätigt neuere Erkenntnisse, dass diese Unterschiede im Bereich der Artenkenntnis abnehmen (Hooykaas et al., 2019). In Bezug auf die insektenbezogenen Einstellungen wiesen männliche Personen jedoch positivere Einstellungen auf als weibliche. Ähnliche Tendenzen haben sich in vorherigen Studien auch in Bezug auf das Thema Evolution finden lassen (Großschedl et al., 2014; Sbeglia & Nehm, 2018). Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass sich diese Unterschiede durch Lerngelegenheiten abbauen lassen (Sbeglia & Nehm, 2018). Geschlechterunterschiede in den insektenbezogenen Einstellungen könnten daher ebenfalls durch fehlende Lerngelegenheiten begründet sein.

6.2 Die Förderung des evolutionsbezogenen Wissens

Nachdem in **Studie I** festgestellt wurde, dass die Zugehörigkeit zu einer konfessionellen Gruppe nur schwach prädiktiv für das evolutionsbezogene Wissen war und hinsichtlich der verschiedenen konfessionellen Gruppen (mit Ausnahme der evangelischen Schüler:innen) kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem evolutionsbezogenen Wissen und der Akzeptanz der Evolution festgestellt werden konnte, wurden in **Studie II** weitere personenbezogene Variablen aufgegriffen. Die hier untersuchten personenbezogenen Variablen zeichnen sich durch einen direkten lernbiografischen Bezug (z. B. hinsichtlich des themenspezifischen Vorwissens, der themen- und biologiebezogenen Selbstwirksamkeitserwartungen sowie der intrinsischen Motivation) aus. Weiterhin wurden unter Berücksichtigung dieser personenbezogenen Variablen Möglichkeiten zur Förderung des evolutionsbezogenen Wissenserwerbs zum Thema phylogenetische Stammbäume untersucht. Ein Fokus lag hierbei auf dem Vergleich der Wirksamkeit verschiedener Instruktionsstrategien in Form von optionalen Lernhilfen (vollständige gestufte Lernhilfen, gestufte Prompts und gestufte Lösungsbeispiele) hinsichtlich der personenbezogenen Variablen und der explorativen Untersuchung des von den Schüler:innen gezeigten Nutzungsverhalten dieser optionalen Lernhilfen.

Der Vergleich der drei Instruktionsstrategien hat ergeben, dass diese sich in ihrer Wirksamkeit hinsichtlich des Lernerfolgs (Wissen im Posttest) und den Selbstwirksamkeitserwartungen nach der Intervention sowie der intrinsischen Motivation bei der Bearbeitung des Lernmaterials nicht unterschieden. Dieses Ergebnis stimmt mit einzelnen Studienergebnissen überein, die keinen erhöhten Lernerfolg durch gestufte Lernhilfen gegenüber anderen Instruktionsstrategien wie Lösungsbeispielen feststellen konnten (Großmann & Wilde, 2019). Gleichzeitig ist der bisherige Forschungsstand heterogen und zeigt unter verschiedenen Bedingungen größere Lernerfolge sowohl für gestufte Lernhilfen (Großmann & Wilde, 2019), Prompts (Hübner et al., 2006)

oder Lösungsbeispiele (Schmidt-Borcherding et al., 2013) im Vergleich zu anderen Instruktionsstrategien oder Kontrollgruppen auf. Unterschiede zu diesen Studienergebnissen könnten in der Anlage der Interventionen liegen. Zum einen behandeln biologiebezogene Studien in dem Forschungsbereich meist Lerneinheiten zum praktischen Arbeiten wie das Experimentieren (z. B. Schmidt-Borcherding et al., 2013) und zum anderen sind die Instruktionen teilweise verpflichtend in das Lernmaterial integriert (z. B. Großmann & Wilde, 2019). In Studie II wurden diese jedoch optional bereitgestellt. Darüber hinaus wurden die unterstützenden Prompts und Lösungsbeispiele den Lernenden nicht direkt in Gänze präsentiert, sondern wie bei gestuften Lernhilfen schrittweise entwickelt. Die Nutzung der optional zur Verfügung gestellten Lernhilfen kann daher geringer ausgefallen sein als in den bisherigen Studien. Da Lernhilfen ihre volle Wirkung erst entfalten können, wenn sie in angemessenem Umfang genutzt werden, sind weitere Untersuchungen zum effektiven Einsatz notwendig.

Dadurch, dass die verschiedenen Lernhilfen den Lernenden optional zur Verfügung gestellt wurden, war ihre Nutzung freiwillig und die Lernenden mussten ihren Bedarf an Unterstützung selbst einschätzen. Dies hatte zur Folge, dass nicht alle Lernenden diese bei der Bearbeitung der Lernmaterialien verwendet haben. Ein ergänzendes Ziel dieser Arbeit war daher zu untersuchen, welche Gründe Lernende bei der Entscheidung für die (Nicht-)Nutzung von optionalen Lernhilfen als relevant bewerteten. Lernende, die die optionalen Lernhilfen genutzt haben, bewerteten insbesondere Probleme beim selbstständigen Lösen der Aufgabe als hoch. Die durchschnittlich zweithöchste Zustimmung erhielt die Aussage, dass die Aufgabe als schwierig wahrgenommen wurde. Eine Nutzung der optionalen Lernhilfen zur Überprüfung der eigenen Antwort oder aus Neugier auf den Inhalt der Lernhilfen wurden moderat bewertet. Am geringsten fielen die Zustimmungswerte für einen Einfluss durch das Nutzungsverhalten der Mitschüler:innen (Nutzung der Lernhilfen) sowie eine angenommene Erwartung zur Nutzung aus. Lernende, die die optionalen Lernhilfen nicht nutzten, gaben eine höchste Zustimmung für den Wunsch zur selbstständigen Lösung der Aufgabe ab. Äquivalent zur Gruppe der Lernenden, die die Lernhilfen nutzten, erfolgte die zweithöchste Zustimmung zu der Aussage, dass die Aufgabe als einfach wahrgenommen wurde. Als moderat bewertet wurde die fehlende Vertrautheit im Umgang mit der Methode sowie vergessen zu haben diese zu nutzen. Auch bei den Lernenden, die die optionalen Lernhilfen nicht nutzten, wurden Items zur Ermittlung des Einflusses des Nutzungsverhaltens der Mitschüler:innen (Nicht-Nutzung der Lernhilfen) und ein Unwohlsein, die Lernhilfen vor den Mitschüler:innen oder vor der Lehrkraft zu nutzen, als gering bewertet. Diese explorativen Ergebnisse geben erste Hinweise darauf, wie Lernende optional zur Verfügung gestellte Lernhilfen bewerten und ihre Nutzung abwägen. Es bedarf jedoch

weiterer Forschung, die vertiefend untersucht, wann Lernende optionale Lernhilfen nutzen und welche Bedingungen hinderlich sind. In einem solchen Ansatz könnte darüber hinaus untersucht werden, ob die Lernenden mit unterschiedlich ausgeprägten Voraussetzungen und Erlebensqualitäten (z. B. geringe vs. hohe intrinsische Motivation) ein unterschiedliches Hilfesuchverhalten (z. B. exekutiv vs. instrumental) zeigen und ob dieses durch die verschiedenen Hilfetypen (z. B. gestufte Lösungsbeispiele vs. gestufte Prompts) unterschiedlich bedient wird. Exekutives Hilfesuchverhalten hat zum Ziel die eigene Anstrengung zu reduzieren, während instrumentales Hilfesuchverhalten dazu dient das eigene Verständnis sowie die eigenen Fähigkeiten zu verbessern, wodurch beide potenziell auf das Nutzungsverhalten von Lernenden wirken (Karabenick & Knapp, 1991; Karabenick & Newman, 2006).

Die Einschätzung des eigenen Bedarfs an Unterstützung stellt Lernende vor die Herausforderung selbst zu bestimmen, ob die Nutzung einer optionalen Lernhilfe sinnvoll ist (Arnold et al., 2017; Schmidt-Weigand et al., 2009). Dies kann zu Fehleinschätzungen durch die Lernenden führen (Tinajero et al., 2024), sodass Lernende diese möglicherweise zu häufig oder zu selten nutzen. Darüber hinaus weist bisherige Forschung darauf hin, dass vor allem Lernende mit stärker ausgeprägten motivationalen Orientierungen beispielsweise zur Erreichung persönlicher Lernziele eher dazu tendieren, sich Hilfe zu suchen als Lernende mit geringer Ausprägung (Martín-Arbós et al., 2021; Newman, 1990). In der Folge könnten Lernende, die die Lernhilfen benötigen diese möglicherweise nicht nutzen. Neben der Erhebung möglicher Beweggründe der Schüler:innen, optionale Lernhilfen (nicht) zu nutzen, wurde daher in einem weiteren Schritt verglichen, ob sich die Schüler:innen, die die optionalen Lernhilfen nutzten, hinsichtlich ihrer lernbiografischen Eigenschaften und deren Entwicklung durch die Intervention von den Schüler:innen unterschieden, die diese nicht nutzten. Hierbei konnte festgestellt werden, dass Schüler:innen, die die optionalen Lernhilfen nutzten, signifikant geringere Werte in ihrem Vorwissen, ihren biologie- und themenspezifischen Selbstwirksamkeitserwartungen sowie ihrer biologiebezogenen intrinsischen Motivation aufwiesen als Schüler:innen, die diese nicht nutzten. Diese Ergebnisse geben einen ersten Hinweis darauf, dass die Schüler:innen ihr biologiebezogenes Wissen und ihre entsprechenden Fähigkeiten angemessen einschätzten und sich entsprechend Hilfe suchten. Um daraus konkretere Schlüsse ableiten zu können, ist jedoch weitere Forschung notwendig, die beispielsweise in einem qualitativen Studiendesign die Gründe für die (Nicht-)Nutzung optionaler Lernhilfen in Bezug auf die individuellen Selbstwirksamkeitserwartungen untersucht.

Der Vergleich der Schüler:innendaten nach der Intervention legt nahe, dass sowohl Schüler:innen, die die optionalen Lernhilfen nutzten, als auch diejenigen, die diese nicht nutzten, ihr evolutionsbezogenes Wissen bezüglich phylogenetischer Stammbäume erweitert und sich auch ihre Selbstwirksamkeitserwartungen hinsichtlich ihrer Fähigkeiten im Umgang mit phylogenetischen Stammbäumen positiv entwickelt haben. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse jedoch auch, dass die Lücke zwischen diesen beiden Gruppen hinsichtlich des phylogenetischen Wissens und den entsprechenden Selbstwirksamkeitserwartungen nicht geschlossen werden konnte, da die Schüler:innen, die die optionalen Lernhilfen nutzten, in beiden Variablen geringere Werte aufwiesen. Dieses Ergebnis ergänzt die bisherige Forschung, die einen Zusammenhang zwischen dem Lernerfolg und den dazugehörigen Selbstwirksamkeitserwartungen annimmt (z. B. Multon et al., 1991; Weinberg et al., 1979). Gleichzeitig wirft dieses Ergebnis die Frage danach auf, wie optionale Lernhilfen gestaltet sein müssen, um diese Unterschiede auszugleichen. Hierbei wäre insbesondere ein Vergleich der Ergebnisse zur Wirkungsweise der drei optionalen Lernhilfen zwischen Lernenden, die diese freiwillig verwendet haben sinnvoll (siehe Kapitel 6.3).

Die intrinsische Motivation bei der Bearbeitung des Lernmaterials wurde mittels vier Teilindikatoren bestimmt. Während der Intervention konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Teilindikatoren zur Wahrnehmung von *Kompetenz*, *Wahlfreiheit* und *Druck/Anspannung* festgestellt werden, jedoch hinsichtlich des empfundenen *Interesses/Vergnügens* bei der Bearbeitung der Aufgaben. Hierbei wiesen Schüler:innen, die die optionalen Lernhilfen nutzten, ein geringeres Interesse an der Lerneinheit auf als Schüler:innen, die diese nicht nutzten. Hinsichtlich des Vergleiches dieser Variablen wäre es in künftigen Studien sinnvoll eine Kontrollgruppe einzuführen (siehe Kapitel 6.3). Da die Nutzung der Lernhilfen auf Freiwilligkeit beruhte und die Lernenden so selbst über ihre Nutzung entscheiden konnten, könnte ein Gefühl der Wahlfreiheit gefördert worden sein, dass in beiden Gruppen ausgelöst wurde. Ähnlich könnten fehlende Unterschiede bei der Bewertung der wahrgenommenen Kompetenz durch die entsprechende selbstbestimmte (Nicht-)Nutzung zu Stande gekommen sein: Schüler:innen, die die optionalen Lernhilfen nicht nutzten, schätzten ihre Kompetenz möglicherweise höher ein, weshalb sie diese nicht in Anspruch nahmen. Schüler:innen, die die optionalen Lernhilfen nutzten, wurden zur Lösung der Aufgabe befähigt, wodurch sie sich möglicherweise selbst als kompetenter wahrnehmen konnten. Um solche Effekte zu prüfen sind jedoch weitere Studien nötig, bei denen gezielte Vergleiche beispielsweise mit Lernenden, die Aufgaben ohne jegliche Hilfe lösen müssen, durchgeführt werden (siehe Kapitel 6.3). Ungeklärt bleibt jedoch, weshalb Schüler:innen, die die optionalen Lernhilfen genutzt haben, ein signifikant geringeres Interesse

und Vergnügen an der Bearbeitung des Lernmaterials aufwiesen. Vor dem Hintergrund des vergleichsweise geringeren Lernerfolgs von Schüler:innen, die die optionalen Lernhilfen genutzt haben, könnten die zur Verfügung gestellten Lernhilfen nicht ausreichend zur Unterstützung bei der Bewältigung des Lernmaterials sowie der Motivierung gewesen sein. Dies könnte insbesondere bei Lernenden mit exekutiven Hilfesuchverhalten zu Frustration und somit einem geringeren Interesse und Vergnügen geführt haben. Auch hier wäre in künftigen Studien ein ergänzender (qualitativer) Ansatz denkbar, der diesen Zusammenhang untersucht und auch das weitere Nutzungsverhalten der Lernenden im Verlauf der Intervention (z. B. anhand von Videographien) analysiert.

6.3 Limitationen

Die in dieser Dissertation durchgeführten Studien sind alle als Feldstudien angelegt. Dieser Ansatz bietet den Vorteil einer im Vergleich zu Laboruntersuchungen gesteigerten externen Validität, das heißt einer höheren Generalisierbarkeit der Ergebnisse beispielsweise für die weitere Unterrichtsforschung und Anwendung in der Unterrichtspraxis. Bei einer Datenerhebung im Feld, kann der Einfluss von (un-)bekannten Störvariablen, beispielsweise aufgrund von akuten Konflikten in der Klasse oder anstehenden Prüfungen, nicht gänzlich kontrolliert werden. Eine Randomisierung wie in Studie II kann solchen Einflüssen entgegenwirken, indem diese auf alle Gruppen gleichermaßen verteilt werden (Döring et al., 2016).

Auch Schwankungen in der Stichprobengröße können durch die realen Bedingungen im Feld begründet sein. Bei der Interpretation der Ergebnisse sollte daher die jeweilige Stichprobengröße berücksichtigt werden. Insbesondere in Hinblick auf den Vergleich von Gruppen in Form von Substichproben könnte die Aussagekraft einzelner Befunde aufgrund geringer oder unterschiedlicher Stichprobengrößen eingeschränkt sein (Döring et al., 2016). Die Unterschiede in den Stichprobengrößen sind teilweise in der Anlage der Studien begründet. In **Studie I** wurden die Substichproben anhand der konfessionellen Zugehörigkeit der Schüler:innen gebildet. Da die Datenerhebung im Feld stattfand, spiegelt die unterschiedlich starke Besetzung der Substichproben in Teilen die konfessionelle Zusammensetzung innerhalb der deutschen Bevölkerung wider. So stellen Katholik:innen mit einem Anteil von 26,7% beispielsweise eine vergleichsweise größere Gruppe als Muslim:innen mit einem Anteil von 5 bis 6% dar (Bundesamt für Migration und Flüchtlinge, 2020; Bundesministerium des Innern, 2025). Solchen Unterschieden in der Stichprobengröße könnte durch eine gezielte Auswahl der Teilnehmenden entgegengewirkt werden. Allerdings verringert sich in einem solchen quasi-experimentellen Design die interne Validität, da mögliche Störfaktoren (z. B. Art des Lernstandorts) durch die

Vorauswahl der Proband:innen einen stärkeren Einfluss auf die Ergebnisse nehmen können und daher kontrolliert werden müssen (Döring et al., 2016).

In Anlehnung an **Studie II** könnten künftige Studien jedoch eine Erhöhung der Stichprobengrößen in den Experimentalgruppen anstreben, um so belastbarere Ergebnisse zu generieren. Dies könnte durch eine Reduktion der Anzahl der erprobten Lernmethoden von drei auf zwei Experimentalgruppen erreicht werden. Da in der bisherigen Forschung vor allem gestufte Lernhilfen und zur Verfügung gestellte Lösungsbeispiele in ihrer Wirksamkeit miteinander verglichen wurden (z. B. Großmann & Wilde, 2019; Schmidt-Weigand et al., 2008), würde ein Vergleich von gestuften Lernhilfen mit (gestuften) Prompts den bisherigen Forschungsstand zusätzlich erweitern. Ein solches Vorgehen kann innerhalb der Interventionsgruppen die Stichprobengröße der Schüler:innen, die die optionalen Lernhilfen nutzen, erhöhen und würde dadurch die Möglichkeit eröffnen, nicht nur zwischen der generellen Nutzung und Nicht-Nutzung der optionalen Lernhilfen zu unterscheiden, sondern die Wirksamkeit der untersuchten Lernhilfen (z. B. gestufte Lernhilfen vs. gestufte Prompts) ausschließlich zwischen Lernenden zu vergleichen, die diese genutzt haben.

Der Vergleich von Experimentalgruppen mit einer Kontrollgruppe ist sinnvoll, um Aussagen über die generelle Wirksamkeit einer Maßnahme wie die Bereitstellung optionaler Lernhilfen zu treffen. Bei dem in dieser Dissertation durchgeführten Forschungsprojekt der **Studie II** wurde jedoch aufgrund der nachfolgenden Einschränkungen bewusst auf eine Kontrollgruppe verzichtet. In künftigen Studien kann, je nach Fragestellung und Studiendesign, die Einführung einer Kontrollgruppe jedoch sinnvoll sein. Bei der Entscheidung zur Gestaltung der Kontrollgruppe sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- *Kontrollgruppentyp I: Lernende erhalten keinerlei Unterstützung bei der Bearbeitung des Lernmaterials*
 - Wird eine Aufgabenstellung nicht verstanden oder das geforderte Grundlagenwissen zur Bearbeitung der Aufgabe ist für Lernende ohne Unterstützung nicht abrufbar, kann dieser Ansatz dazu führen, dass Lernende die Aufgabe nicht oder nur eingeschränkt bearbeiten können und somit ein Vergleich der Ergebnisse nicht möglich ist. Eine Möglichkeit dem entgegenzuwirken besteht darin, Hinweise (z. B. in Form von Prompts) für alle Lernenden auf dem Material sichtbar zu integrieren. In diesem Falle könnte die Vergleichbarkeit mit den Experimentalgruppen (z. B. zu optionalen gestuften Prompts) jedoch eingeschränkt sein.

- Darüber hinaus könnte eine fehlende Möglichkeit, sich Hilfe zu suchen, eine Frustration bei Lernenden auslösen, die ebenfalls dazu führen könnte, dass sie die Aufgabe nicht (weiter)bearbeiten.
- *Kontrollgruppentyp II: Lernende erhalten bei Bedarf Unterstützung durch die Lehrkraft*
 - Das Beziehungsverhältnis zwischen Lernenden und Lehrenden kann das Hilfesuchverhalten der Lernenden beeinflussen. Lernende mit einer schlechten Beziehung zur Lehrkraft suchen in der Folge möglicherweise seltener nach Hilfe als Lernende mit einer guten Beziehung zur Lehrkraft. Dieser Problematik kann durch den Einsatz neutraler Personen, wie der Versuchsleitung oder anderer geschulter Personen, entgegengewirkt werden.
 - Persönliche Eigenschaften der Lernenden und das Klassenklima könnten das Verhalten der Lernenden zur Hilfesuche ebenfalls beeinflussen, sodass schüchterne Schüler:innen sich beispielsweise weniger trauen könnten nachzufragen. Eine Möglichkeit dem entgegenzuwirken bestünde darin, die Lernenden (in Absprache mit der Lehrkraft) in kleinere vertraute Gruppen aufzuteilen und somit den Einfluss möglicher hinderlicher Strukturen zu minimieren.
 - Eine Lehrperson kann immer nur eine:n Schüler:in gleichzeitig betreuen, sodass Lernende gegebenenfalls länger auf die Beantwortung ihrer Frage warten müssen. Auch hier wäre der Einsatz weiterer Personen zur Unterstützung denkbar. Dieser Ansatz würde jedoch reale Bedingungen im Unterricht weniger gut abbilden.
 - Aufgrund der individuellen Fragen der Lernenden, ist es wichtig sicherzustellen, dass allen Lernenden die gleichen Informationen zur Verfügung gestellt werden. Mögliche Fragen sollten daher zuvor antizipiert und anhand eines Leitfadens festgelegt werden, in welchem Umfang die Lehrkraft Erklärungen ausführt.
 - Die Möglichkeit bei der Lehrkraft nachzufragen könnte dazu führen, dass vor allem Lernende mit einem exekutiven Hilfesuchverhalten häufiger nachfragen, um schneller an Informationen zu gelangen, die sie sich selbst erarbeiten müssten. Auch hier könnte der Einsatz eines Leitfadens für den Umfang der Erklärungen durch die Lehrkraft sinnvoll sein.

Hinsichtlich der explorativen Analyse zur (Nicht-)Nutzung von optional zur Verfügung gestellten Lernhilfen in **Studie II** können im Rahmen dieser Dissertation erste Erkenntnisse abgeleitet werden, die in weiteren Studien vertiefend erforscht werden sollten. Hierbei könnte neben dem in dieser Dissertation vorgeschlagenen quantitativen Ansatz, auch eine qualitative Annäherung

weitere Aufklärung bieten. Einen möglichen Ansatz stellt die Dokumentation der Entscheidungsprozesse zur (Nicht-)Nutzung der optionalen Lernhilfen durch „lautes Denken“ dar (Döring et al., 2016). Dadurch könnten die oftmals unbewussten Entscheidungsprozesse mess- und analysierbar gemacht werden. Zudem könnte mit diesem Ansatz eine inhaltliche Validierung der vorgeschlagenen Kriterien (Gründe für die [Nicht-]Nutzung der optionalen Lernhilfen) vorgenommen werden.

Da sich viele Studien zum Wissen an ältere Personen (insbesondere Studierende) richten und oftmals vielfältige Messinstrumente eingesetzt werden, ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zum Wissen in Studie II und III mit anderen Studien möglicherweise eingeschränkt (Barnes et al., 2019; Kuschmierz, Meneganzin, et al., 2020). Auch trotz sorgfältiger Auswahl validierter Instrumente, die bereits in vergleichbaren Altersgruppen erprobt wurden, können hohe Reliabilitäten nicht immer sichergestellt werden. Bei der Planung von **Studie II** wurden daher verschiedene öffentlich zugängliche und validierte Tests zur Erhebung des Wissens über phylogenetische Stammbäume verglichen. Diese waren in der Regel für Studierende entwickelt und bezogen sich daher häufig auf sehr komplexe Strukturen. Zur Erhebung des Wissens im Posttest wurde das Testinstrument BETTSI 3.0 von Jenkins et al. (2022) eingesetzt, da dieses vergleichsweise reduzierte phylogenetischen Stammbäume abbildet. Dennoch ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen, dass dieser Test an Studierenden validiert wurde und daher für die in Studie II untersuchte Gruppe (Schüler:innen der Sekundarstufe II) möglicherweise in Teilen zu komplex ist. Diese Schwierigkeit wurde in Hinblick auf **Studie III** aufgegriffen, sodass unter anderem Items, die fachlich und sprachlich für Schüler:innen in der Erprobungsstufe nicht passend waren (z. B. wenn Fachbegriffe wie ‚Endosymbiont‘ verwendet wurden), ausgeschlossen wurden.

6.4 Implikationen und Ausblick

Beim Lernen im Biologieunterricht kommen vielfältige personenbezogene Variablen zum Tragen, deren komplexes Zusammenspiel noch nicht hinreichend erforscht ist. Diese Arbeit hat sich einer Auswahl dieser Variablen gewidmet und den Forschungsstand dahingehend erweitert sowie Hinweise für ihre Relevanz in der (schulischen) Lehre aufgezeigt. So konnten positive Zusammenhänge zwischen dem Wissen und den Einstellungen gegenüber einem Thema in verschiedenen Kontexten bestätigt werden. Tendenzen zur möglichen Entwicklung dieses Zusammenhangs über verschiedene Bildungsstände ließen sich jedoch nur eingeschränkt auf verschiedene Kontexte übertragen. Während die Stärke des Zusammenhangs beim Thema Insekten bei höheren Bildungsständen abnahm (Studie III), wiesen die Ergebnisse im Kontext Evolution

(Studie I) im Vergleich mit bisherigen Studien zu (angehenden) Lehrkräften, zum Beispiel von Beniermann (2019) oder Großschedl et al. (2018), auf eine Zunahme des Zusammenhangs mit steigendem Bildungsstand hin. Es hat sich zudem gezeigt, dass sich Einstellungen bei bestimmten Gruppen mit zunehmendem Bildungsstand auch verschlechtern können (Studie III). Da eine Aufgabe des Biologieunterrichts die Befähigung zur gesellschaftlichen Teilhabe und somit auch zum Schutz von Natur und Umwelt darstellt, ist eine Förderung positiver Einstellungen durch den Biologieunterricht sinnvoll. Dies könnte beispielsweise durch Ermöglichung positiver Erfahrungen (z. B. durch Naturkontakt Lindemann-Matthies, 2002) geschehen. Auch vor dem Hintergrund, dass sich in Studie I die Religiosität einer Person als prädiktiv für die Akzeptanz der Evolution gezeigt hat, könnten Unterrichtsansätze zum Abbau möglicher wahrgenommener Konflikte oder Hemmungen im Umgang mit bestimmten Themen wie der Evolution (z. B. durch das Aufzeigen der Vereinbarkeit von religiösen und naturwissenschaftlichen Vorstellungen, Truong et al., 2018) für das Lernen im Biologieunterricht förderlich sein. Ziel dieser Förderung darf jedoch nicht sein, Schüler:innen bestimmte Einstellungen aufzuzwingen und sie zu indoktrinieren, sondern ihnen beim Wissenserwerb zu helfen, indem Vorbehalte abgebaut werden, die für den Lernprozess hinderlich sein könnten (Unsworth & Voas, 2021; Waschke & Lammers, 2012). Ein solches Vorgehen kann nicht nur den Wissenserwerb fördern, sondern befähigt Schüler:innen auch in weiteren Bereichen (z. B. beim Thema Impfen) dazu differenzierte und selbstbestimmte Entscheidungen zu treffen (Smith & Siegel, 2016). Ein Ziel der künftigen Lehramtsausbildung im Fach Biologie sollte daher auch die Sensibilisierung von Lehrkräften für unterschiedliche Zugänge zu bestimmten Themen und deren multiperspektivische Anleitung im Biologieunterricht sein (z. B. durch Entwicklung einer kulturellen Kompetenz bei Lehrkräften, Barnes, Werner, et al., 2020; Dunk et al., 2019; Truong et al., 2018; Waschke & Lammers, 2012).

Hinsichtlich des evolutionsbezogenen Wissens hat sich in Studie I ergeben, dass dieses insgesamt eher gering ausfällt und fachlich inadäquate Vorstellungen in geringem Maße bestehen bleiben (Aptyka et al., 2022). Diese Arbeit liefert daher einen Ansatz zur Förderung des evolutionsbezogenen Wissens mittels verschiedener Instruktionsstrategien (Studie II). Da sich in Studie II alle drei Instruktionsstrategien (gestufte Lernhilfen, gestufte Prompts und gestufte Lösungsbeispiele) als gleichwirksam erwiesen haben, können diese Ergebnisse für die Unterrichtspraxis eine Entlastung der Lehrkräfte bedeuten, indem äquivalent zu vollständigen gestuften Lernhilfen auch gestufte Prompts eingesetzt werden können. Hinsichtlich solcher konkreten Schlussfolgerungen bedarf es jedoch weiterer Forschung, beispielsweise durch den Vergleich

einzelner Instruktionsstrategien (z. B. gestuften Lernhilfen mit [gestuften] Prompts; siehe Kapitel 6.3).

Weiterhin stellt eine Erprobung von digitalen Lösungen eine sinnvolle Ergänzung dar. Die Verwendung von digitalen Lernhilfen könnte einerseits dazu dienen, Hemmungen bei der Nutzung abzubauen, da diese unauffälliger genutzt werden können als papierbasierte Lernhilfen. Außerdem bieten digitale Ansätze die Möglichkeit den Unterstützungsprozess durch gestufte Lernhilfen weiter zu individualisieren und gleichzeitig die Lehrkraft zu entlasten. Hierbei kann der Einsatz künstlicher Intelligenz beispielsweise in Form von personalisierten KI-Chatbots (Customized AI Chatbots) ganz neue Möglichkeiten der Förderung bieten, wenn ihr Einsatz didaktisch begleitet wird (Chang et al., 2023; Kilinc, 2025).

7 Fazit

Diese Dissertation hatte einerseits zum Ziel potenziell relevante Lernendenmerkmale für das Lernen im Biologieunterricht zu identifizieren. Diese wurden exemplarisch im Kontext der Evolution untersucht und durch Ergebnisse zum Thema Insekten ergänzt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Wissen der Lernenden je nach Kontext, Bildungsstand und weiteren personenbezogenen Variablen wie die konfessionelle Zugehörigkeit unterschiedlich stark ausfällt. Auch haben sich positive Zusammenhänge zu den jeweiligen themenbezogenen Einstellungen bestätigt.

Ein weiteres Ziel dieser Dissertation war die Erprobung anschlussfähiger Fördermaßnahmen anhand ausgewählter Instruktionsstrategien. Auch hier haben sich personenbezogene Variablen mit direktem Bezug zur biologiebezogenen Lernbiografie (z. B. dem Vorwissen oder den Selbstwirksamkeitserwartungen) als potenziell bedeutsam für den (durch Instruktionsstrategien angeleiteten) Wissenserwerb gezeigt. Diese Arbeit gibt daher einen Anstoß für die weitere Erforschung zur Wirksamkeit von Instruktionsstrategien in Form von optionalen Lernhilfen bei Lernenden mit unterschiedlich ausgeprägten Lernendenmerkmalen.

Literaturverzeichnis

- Aleknavičiūtė, V., Lehtinen, E., & Södervik, I. (2023). Thirty years of conceptual change research in biology – A review and meta-analysis of intervention studies. *Educational Research Review*, 41, 100556. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2023.100556>
- Anderson, L. W., Krathwohl, D. R., Airasian, P. W., Cruikshank, K. A., Maver, R. E., Pintrich, P. R., Raths, J., & Wittrock, M. C. (2001). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. Longman.
- Anderson, R. D. (2007). Teaching the theory of evolution in social, intellectual, and pedagogical context. *Science Education*, 91(4), 664-677. <https://doi.org/10.1002/sce.20204>
- Aptyka, H., Fiedler, D., & Großschedl, J. (2022). Effects of situated learning and clarification of misconceptions on contextual reasoning about natural selection. *Evolution: Education and Outreach*, 15, Article 5. <https://doi.org/10.1186/s12052-022-00163-5>
- Aptyka, H., & Großschedl, J. (2022). Analyzing pre-service biology teachers' intention to teach evolution using the theory of planned behavior. *Evolution: Education and Outreach*, 15(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s12052-022-00175-1>
- Arnold, J., Kremer, K., & Mayer, J. (2017). Scaffolding beim Forschenden Lernen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 23(1), 21–37. <https://doi.org/10.1007/s40573-016-0053-0>
- Asghar, A., Wiles, J., & Alters, B. (2007). Canadian pre-service elementary teachers' conceptions of biological evolution and evolution education. *McGill journal of education*, 42, 189-209.
- Bandura, A. (1978). Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change. *Advances in Behaviour Research and Therapy*, 1(4), 139–161. [https://doi.org/10.1016/0146-6402\(78\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0146-6402(78)90002-4)
- Barnes, M. E., Aini, R. Q., Collins, J. P., Dunk, R. D. P., Holt, E. A., Jensen, J., Klein, J. R., Misheva, T., Nadelson, L. S., Reiss, M. J., Romine, W. L., Shtulman, A., Townley, A. L., Wiles, J. R., Zheng, Y., & Brownell, S. E. (2024). Evaluating the current state of evolution acceptance instruments: a research coordination network meeting report. *Evolution: Education and Outreach*, 17(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s12052-024-00194-0>
- Barnes, M. E., Dunlop, H. M., Holt, E. A., Zheng, Y., & Brownell, S. E. (2019). Different evolution acceptance instruments lead to different research findings. *Evolution: Education and Outreach*, 12(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s12052-019-0096-z>
- Barnes, M. E., Dunlop, H. M., Sinatra, G. M., Hendrix, T. M., Zheng, Y., & Brownell, S. E. (2020). “Accepting evolution means you can’t believe in god”: Atheistic perceptions of evolution among college biology students. *CBE Life Sci Educ*, 19(2), article 21. <https://doi.org/10.1187/cbe.19-05-0106>
- Barnes, M. E., Evans, E. M., Hazel, A., Brownell, S. E., & Nesse, R. M. (2017). Teleological reasoning, not acceptance of evolution, impacts students' ability to learn natural selection. *Evolution: Education and Outreach*, 10(1), Article 7. <https://doi.org/10.1186/s12052-017-0070-6>
- Barnes, M. E., Supriya, K., Zheng, Y., Roberts, J. A., & Brownell, S. E. (2021). A new measure of students' perceived conflict between evolution and religion (PCoRE) Is a stronger

- predictor of evolution acceptance than understanding or religiosity. *CBE—Life Sciences Education*, 20(3), Article 42. <https://doi.org/10.1187/cbe.21-02-0024>
- Barnes, M. E., Werner, R., & Brownell, S. E. (2020). Differential impacts of religious cultural competence on students' perceived conflict with evolution at an Evangelical university. *The American Biology Teacher*, 82, 93-101. <https://doi.org/10.1525/abt.2020.82.2.93>
- Barone, L. M., Petto, A. J., & Campbell, B. C. (2014). Predictors of evolution acceptance in a museum population. *Evolution: Education and Outreach*, 7(1), Article 23. <https://doi.org/10.1186/s12052-014-0023-2>
- Benierrmann, A. (2019). *Evolution - von Akzeptanz und Zweifeln. Empirische Studien über Einstellungen zu Evolution und Bewusstsein* (Erste Ausg.). Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24105-6>
- Benierrmann, A., Kuschmierz, P., Pinxten, R., Aivelo, T., Bohlin, G., Brennecke, J., Cebesoy, Ü., Cvetković, D., Đorđević, M., Dvořáková, R., Futo, M., Geamana, N., Korfiatis, K., Lendvai, A., Mogias, A., Paolucci, S., Petersson, M., Pietrzak, B., Porozovs, J., & Graf, D. (2021). Evolution Education Questionnaire on acceptance and knowledge (EEQ) - Standardised and ready-to-use protocols to measure acceptance of evolution and knowledge about evolution in an international context. *COST: European cooperation in science & technology*, 22. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4554742>
- Betti, L., Shaw, P., & Behrends, V. (2020). Acceptance of biological evolution by first-year life sciences university students. *Science & Education*, 29(2), 395-409. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00110-0>
- Bishop, B. A., & Anderson, C. W. (1990). Student conceptions of natural selection and its role in evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(5), 415-427. <https://doi.org/10.1002/tea.3660270503>
- Bjerke, T., & Østdahl, T. (2004). Animal-related attitudes and activities in an urban population. *Anthrozoös*, 17(2), 109-129. <https://doi.org/10.2752/089279304786991783>
- Blacquiere, L. D., & Hoese, W. J. (2016). A valid assessment of students' skill in determining relationships on evolutionary trees. *Evolution: Education and Outreach*, 9, 5. <https://doi.org/10.1186/s12052-016-0056-9>
- Bloom, B. S., Engelhart, M. D., Furst, E. J., Hill, W. H. & Krathwohl, D. R. (1956). *Taxonomy of educational objectives. The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain*. (B. S. Bloom, Engelhart, M. D., Furst, E. J., Hill, W. H. & Krathwohl, D. R., Hrsg. Erste Ausg.). David McKay Company, Inc.
- Bloom, P., & Weisberg, D. (2007). Childhood origins of adult resistance to science. *Science (New York, N.Y.)*, 316, 996-997. <https://doi.org/10.1126/science.1133398>
- Borghans, L., Diris, R., & Tavares, M. (2024). Student characteristics and effort during test-taking. *Learning and Instruction*, 93, 101924. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2024.101924>
- Bundesamt für Migration und Flüchtlinge. (2020). *Muslimisches Leben in Deutschland 2020. Studie im Auftrag der Deutschen Islam Konferenz*. Abgerufen von https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/themen/heimat-integration/dik/mlid-2020-kurz.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- Bundesministerium des Innern. (2025). *Islam in Deutschland*. <https://www.bmi.bund.de/DE/themen/heimat-integration/staat-und-religion/islam-in-deutschland/islam-in-deutschland-node.html>

- Campbell, N. A., Kratochwil, A., Lazar, T., & Reece, J. B. (2009). *Biologie*. Pearson Studium.
- Catley, K. M. (2006). Darwin's missing link—a novel paradigm for evolution education. *Science Education*, 90(5), 767-783. <https://doi.org/10.1002/sce.20152>
- Catley, K. M., & Novick, L. R. (2009). Digging deep: Exploring college students' knowledge of macroevolutionary time. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(3), 311-332. <https://doi.org/10.1002/tea.20273>
- Chang, D. H., Lin, M. P.-C., Hajian, S., & Wang, Q. Q. (2023). Educational Design Principles of Using AI Chatbot That Supports Self-Regulated Learning in Education: Goal Setting, Feedback, and Personalization. *Sustainability*, 15(17), 12921. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/17/12921>
- Clément, P. (2015). Muslim teachers' conceptions of evolution in several countries. *Public Understanding of Science*, 24(4), 400-421. <https://doi.org/10.1177/0963662513494549>
- Clucas, B., McHugh, K., & Caro, T. (2008). Flagship species on covers of US conservation and nature magazines. *Biodiversity and Conservation*, 17(6), 1517-1528. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9361-0>
- Deniz, H., Donnelly, L. A., & Yilmaz, I. (2008). Exploring the factors related to acceptance of evolutionary theory among Turkish preservice biology teachers: Toward a more informative conceptual ecology for biological evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(4), 420-443. <https://doi.org/10.1002/tea.20223>
- Döring, N., Bortz, J., & Poeschl-Guenther, S. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Springer.
- Dunk, R. D. P., Barnes, M. E., Reiss, M. J., Alters, B., Asghar, A., Carter, B. E., Cotner, S., Glaze, A. L., Hawley, P. H., Jensen, J. L., Mead, L. S., Nadelson, L. S., Nelson, C. E., Pobiner, B., Scott, E. C., Shtulman, A., Sinatra, G. M., Southerland, S. A., Walter, E. M., . . . Wiles, J. R. (2019). Evolution education is a complex landscape. *Nature Ecology & Evolution*, 3(3), 327-329. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0802-9>
- Ecklund, E. H., & Scheitle, C. P. (2014). Religion among Academic Scientists: Distinctions, Disciplines, and Demographics. *Social Problems*, 54(2), 289-307. <https://doi.org/10.1525/sp.2007.54.2.289>
- Erwin, D. H. (2000). Macroevolution is more than repeated rounds of microevolution. *Evolution & Development*, 2(2), 78-84. <https://doi.org/10.1046/j.1525-142x.2000.00045.x>
- Europarat. (2007). *The dangers of creationism in education*. (Doc. 11375). Luxemburg: Committee on Culture, Science and Education Abgerufen von <https://assembly.coe.int/Documents/WorkingDocs/2007/EDOC11375.pdf>
- Evangelische Kirche in Deutschland. (2023). Wie hältst du's mit der Kirche? Zur Bedeutung der Kirche in der Gesellschaft Erste Ergebnisse der 6. Kirchenmitgliedschaftsuntersuchung. https://kmu.ekd.de/fileadmin/user_upload/kirchenmitgliedschaftsuntersuchung/PDF/Wie_h%C3%A4ltst_du%E2%80%99s_mit_der_Kirche_%E2%80%93_Zur_Bedeutung_der_Kirche%E2%80%93in%E2%80%93der%E2%80%93Gesellschaft_KMU_6.pdf
- Evans, E. M. (2001). Cognitive and contextual factors in the emergence of diverse belief systems: creation versus evolution. *Cognitive Psychology*, 42(3), 217-266. <https://doi.org/10.1006/cogp.2001.0749>

- Everhart, D., & Hameed, S. (2013). Muslims and evolution: a study of Pakistani physicians in the United States. *Evolution: Education and Outreach*, 6(1), Article 2. <https://doi.org/10.1186/1936-6434-6-2>
- Federer, M. R., Nehm, R. H., Opfer, J. E., & Pearl, D. (2015). Using a constructed-response instrument to explore the effects of item position and item features on the assessment of students' written scientific explanations. *Research in Science Education*, 45(4), 527-553. <https://doi.org/10.1007/s11165-014-9435-9>
- Fenner, A. (2013). *Schülervorstellungen zur Evolutionstheorie: Konzeption und Evaluation von Unterricht zur Anpassung durch Selektion*. Universitätsbibliothek Gießen. <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2013/9250>
- Fiedler, D., & Harms, U. (2024). Schwellenkonzepte: Die Bedeutung von Zufall und Wahrscheinlichkeit in der Evolutionsbiologie. In S. Gemballa & U. Kattmann (Hrsg.), *Didaktik der Evolutionsbiologie: Zwischen Fachkonzepten und Alltagsvorstellungen vermitteln* (S. 123-133). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-69030-7_7
- Fowler, J. W., & Dell, M. L. (2006). Stages of faith from infancy through adolescence: reflections on three decades of faith development theory. In E. C. Roehlkepartain, P. E. King, L. Wagener, & P. L. Benson (Hrsg.), *The handbook of spiritual development in childhood and adolescence* (S. 34-45). Sage Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781412976657.n3>
- Franke-Braun, G., Schmidt-Weigand, F., Stäudel, L., & Wodzinski, R. (2008). Aufgaben mit gestuften Lernhilfen—ein besonderes Aufgabenformat zur kognitiven Aktivierung der Schülerinnen und Schüler und zur Intensivierung der sachbezogenen Kommunikation. *Lernumgebungen auf dem Prüfstand. Zwischenergebnisse aus den Forschungsprojekten*, 27-42.
- Genovart, M., Tavecchia, G., Enseñat, J. J., & Laiolo, P. (2013). Holding up a mirror to the society: Children recognize exotic species much more than local ones. *Biological Conservation*, 159, 484-489. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.10.028>
- Gentner, N., & Seufert, T. (2020). The Double-Edged Interactions of Prompts and Self-efficacy. *Metacognition and Learning*, 15(2), 261-289. <https://doi.org/10.1007/s11409-020-09227-7>
- Glogger-Frey, I., Fleischer, C., Grüny, L., Kappich, J., & Renkl, A. (2015). Inventing a solution and studying a worked solution prepare differently for learning from direct instruction. *Learning and Instruction*, 39, 72-87. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2015.05.001>
- Göransson, A., Orraryd, D., Fiedler, D., & Tibell, L. A. E. (2020). Conceptual characterization of threshold concepts in student explanations of evolution by natural selection and effects of item context. *CBE—Life Sciences Education*, 19(1), ar1. <https://doi.org/10.1187/cbe.19-03-0056>
- Gould, S. (1997). Nonoverlapping Magisteria. *Natural History*, 106. <https://doi.org/10.53763/fag.2014.11.95>
- Gould, S. J. (1999). *Rocks of ages. Science and religion in the fullness of life*. Library of Contemporary Thought.
- Graf, D., & Hamdorf, E. (2012). Evolution verbreitete Fehlvorstellungen zu einem zentralen Thema. In D. C. Dreesmann, D. Graf, & K. Witte (Hrsg.), *Evolutionsbiologie: Moderne Themen für den Unterricht* (S. 25-41). Spektrum Akademischer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2786-1_1

- Gregory, T. R. (2008). Understanding evolutionary trees. *Evolution: Education and Outreach*, 1(2), 121-137. <https://doi.org/10.1007/s12052-008-0035-x>
- Gregory, T. R. (2009). Understanding natural selection: essential concepts and common misconceptions. *Evolution: Education and Outreach*, 2(2), 156-175. <https://doi.org/10.1007/s12052-009-0128-1>
- Großmann, N., & Wilde, M. (2019). Experimentation in biology lessons: guided discovery through incremental scaffolds. *International Journal of Science Education*, 41(6), 759–781. <https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1579392>
- Großschedl, J., Konnemann, C., & Basel, N. (2014). Pre-service biology teachers' acceptance of evolutionary theory and their preference for its teaching. *Evolution: Education and Outreach*, 7(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s12052-014-0018-z>
- Großschedl, J., Seredszus, F., & Harms, U. (2018). Angehende Biologielehrkräfte: evolutionsbezogenes Wissen und Akzeptanz der Evolutionstheorie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 24(1), 51-70. <https://doi.org/10.1007/s40573-018-0072-0>
- Haddock, G., & Maio, G. R. (2023). Einstellungen. In J. Ullrich, W. Stroebe, & M. Hewstone (Hrsg.), *Sozialpsychologie* (S. 193-226). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65297-8_6
- Hameed, S. (2008). Science and religion. Bracing for Islamic creationism. *Science*, 322(5908), 1637-1638. <https://doi.org/10.1126/science.1163672>
- Hänze, M., Schmidt-Weigand, F., & Stäudel, L. (2010). Gestufte Lernhilfen. In S. Boller & R. Lau (Hrsg.), *Individuelle Förderung durch innere Differenzierung. Ein Praxishandbuch für Lehrerinnen und Lehrer der Sekundarstufe II* (S. 63–73). Beltz.
- Hänze, M., Stäudel, L., Wodzinski, R., Franke-Braun, G., Schmidt-Weigand, F., & Blum, S. (2007). Schritt für Schritt zur Lösung. Differenzierung durch Aufgaben mit gestuften Lernhilfen. *Unterricht Physik*, 18(99/100), 42–45.
- Härtel, T., Randler, C., & Baur, A. (2023). Using species knowledge to promote pro-environmental attitudes? The association among species knowledge, environmental system knowledge and attitude towards the environment in secondary school students. *Animals*, 13(6), 972. <https://doi.org/10.3390/ani13060972>
- Hautmann, M. (2020). What is macroevolution? *Palaeontology*, 63(1), 1-11. <https://doi.org/10.1111/pala.12465>
- Heddy, B. C., & Sinatra, G. M. (2013). Transforming misconceptions: Using transformative experience to promote positive affect and conceptual change in students learning about biological evolution. *Science Education*, 97(5), 723-744. <https://doi.org/10.1002/sce.21072>
- Heinze, A., Herwartz-Emden, L., & Reiss, K. (2007). Mathematikkenntnisse und sprachliche Kompetenz bei Kindern mit Migrationshintergrund zu Beginn der Grundschulzeit. *Zeitschrift für Pädagogik*, 53, 562-581.
- Helama, S. (2024). Nonoverlapping Magisteria Versus Science-Religion Integration: Rereading Stephen Jay Gould. *Theology and Science*, 22(2), 393-406. <https://doi.org/10.1080/14746700.2024.2351648>
- Hines, J. M., Hungerford, H. R., & Tomera, A. N. (1987). Analysis and synthesis of research on responsible environmental behavior: a meta-analysis. *The Journal of Environmental Education*, 18(2), 1-8. <https://doi.org/10.1080/00958964.1987.9943482>

- Hooykaas, M. J. D., Schilthuizen, M., Aten, C., Hemelaar, E. M., Albers, C. J., & Smeets, I. (2019). Identification skills in biodiversity professionals and laypeople: A gap in species literacy. *Biological Conservation*, 238, 108202. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108202>
- Huber, M., & Stallhofer, B. (2010). Diskontinuierliche Texte im Geografieunterricht. *ProLesen. Auf dem Weg zur Leseschule–Leseförderung in den gesellschaftswissenschaftlichen Fächern*, 223–240.
- Huber, S. (2008). Kerndimensionen, Zentralität und Inhalt. Ein interdisziplinäres Modell der Religiosität.
- Hübner, S., Nückles, M., & Renkl, A. (2006). Prompting Cognitive and Metacognitive Processing in Writing-to-Learn Enhances Learning Outcomes. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 28. <https://escholarship.org/uc/item/6t560264>
- Huxham, M., Welsh, A., Berry, A., & Templeton, S. (2006). Factors influencing primary school children's knowledge of wildlife. *Journal of Biological Education*, 41(1), 9–12. <https://doi.org/10.1080/00219266.2006.9656050>
- Jenkins, K. P., Mead, L., Baum, D. A., Daniel, K. L., Bucklin, C. J., Leone, E. A., Gibson, J. P., & Naegle, E. (2022). Developing the BETTSI: A tree-thinking diagnostic tool to assess individual elements of representational competence. *Evolution*, 76(4), 708–721. <https://doi.org/10.1111/evo.14458>
- Jude, N., Klusmann, U., Selcik, F., Sichma, A., Richter, D., & Wolf, D. (2024). *Deutsches Schulbarometer: Befragung Lehrkräfte. Ergebnisse zur aktuellen Lage an allgemein- und berufsbildenden Schulen*. Robert-Bosch-Stiftung. https://www.bosch-stiftung.de/sites/default/files/publications/pdf/2024-04/Schulbarometer_Lehrkraefte_2024_FORSCHUNGSBERICHT.pdf
- Kalyuga, S. (2007). Expertise reversal effect and its implications for learner-tailored instruction. *Educational Psychology Review*, 19(4), 509–539. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9054-3>
- 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
- Kalyuga, S., Chandler, P., & Sweller, J. (2001). Learner experience and efficiency of instructional guidance. *Educational Psychology*, 21(1), 5–23. <https://doi.org/10.1080/01443410124681>
- Kalyuga, S., Chandler, P., Tuovinen, J., & Sweller, J. (2001). When problem solving is superior to studying worked examples. *Paul Chandler*, 93. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.93.3.579>
- Kalyuga, S., & Sweller, J. (2004). Measuring knowledge to optimize cognitive load factors during instruction. *Journal of educational psychology*, 96(3), 558–568. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.3.558>
- Kampourakis, K., & Reiss, M. J. (2018). *Teaching biology in schools: Global research, issues, and trends* (Erste Ausg.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315110158>
- Karabenick, S. A., & Knapp, J. R. (1991). Relationship of academic help seeking to the use of learning strategies and other instrumental achievement behavior in college students. *Journal of educational psychology*, 83(2), 221–230. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.83.2.221>

- Karabenick, S. A., & Newman, R. S. (2006). *Help seeking in academic settings: Goals, groups, and contexts*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203726563>
- Kellert, S. R. (1985). Attitudes toward animals: Age-related development among children. In M. W. Fox & L. D. Mickley (Hrsg.), *Advances in Animal Welfare Science 1984* (S. 43-60). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4998-0_3
- Kellert, S. R. (1993). Values and perceptions of invertebrates. *Conservation Biology*, 7(4), 845-855. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1993.740845.x>
- Kellert, S. R., & Berry, J. K. (1987). Attitudes, Knowledge, and Behaviors toward Wildlife as Affected by Gender. *Wildlife Society Bulletin (1973-2006)*, 15(3), 363-371. <http://www.jstor.org/stable/3782542>
- Kilinc, S. (2025). Personalizing Education in the AI Era: The Comprehensive Impact of Customized Chatbots Across Educational Domains. In M. A. Adarkwah, S. Amponsah, R. Huang, & M. Thomas (Hrsg.), *Artificial Intelligence and Human Agency in Education: Volume Two: AI for Equity, Well-Being, and Innovation in Teaching and Learning* (S. 27-65). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-9251-4_2
- Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work: An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching. *Educational Psychologist*, 41(2), 75-86. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_1
- Klie, T., & Kühn, J. (2022). Familie und Religion. In J. Ecarius & A. Schierbaum (Hrsg.), *Handbuch Familie: Band I: Gesellschaft, Familienbeziehungen und differentielle Felder* (S. 177-193). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-531-19985-6_16
- Konnemann, C., Asshoff, R., & Hammann, M. (2012). Einstellungen zur Evolutionstheorie: Theoretische und messtheoretische Klärungen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 55-79.
- Konnemann, C., Asshoff, R., & Hammann, M. (2016). Insights Into the Diversity of Attitudes Concerning Evolution and Creation: A Multidimensional Approach. *Science Education*, 100(4), 673-705. <https://doi.org/10.1002/sce.21226>
- Krosnick, J. A., & Petty, R. E. (1995). Attitude strength: An overview. In *Attitude strength: Antecedents and consequences*. (S. 1-24). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Kummer, T. A., Whipple, C. J., & Jensen, J. L. (2016). Prevalence and persistence of misconceptions in tree thinking. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 17(3), 389-398. <https://doi.org/10.1128/jmbe.v17i3.1156>
- Kuszmierz, P., Beniermann, A., Bergmann, A., Pinxten, R., Aivelo, T., Berniak-Woźny, J., Bohlin, G., Bugallo-Rodriguez, A., Cardia, P., Cavadas, B. F. B. P., Cebesoy, U. B., Cvetković, D. D., Demarsy, E., Đorđević, M. S., Drobniak, S. M., Dubchak, L., Dvořáková, R. M., Fančovičová, J., Fortin, C., . . . Graf, D. (2021). European first-year university students accept evolution but lack substantial knowledge about it: a standardized European cross-country assessment. *Evolution: Education and Outreach*, 14(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s12052-021-00158-8>
- Kuszmierz, P., Beniermann, A., & Graf, D. (2020). Development and evaluation of the knowledge about evolution 2.0 instrument (KAEVO 2.0). *International Journal of Science Education*, 42(15), 2601-2629. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1822561>

- Kuschmierz, P., Meneganzin, A., Pinxten, R., Pievani, T., Cvetković, D., Mavrikaki, E., Graf, D., & Beniermann, A. (2020). Towards common ground in measuring acceptance of evolution and knowledge about evolution across Europe: A systematic review of the state of research. *Evolution: Education and Outreach*, 13(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s12052-020-00132-w>
- Lammert, N. (2012). *Akzeptanz, Vorstellungen und Wissen von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I zu Evolution und Wissenschaft*. Technische Universität Dortmund. <https://doi.org/10.17877/DE290R-4832>
- Lindemann-Matthies, P. (2002). The influence of an educational program on children's perception of biodiversity. *The Journal of Environmental Education*, 33, 22-31. <https://doi.org/10.1080/00958960209600805>
- Lindemann-Matthies, P. (2005). 'Loveable' mammals and 'lifeless' plants: how children's interest in common local organisms can be enhanced through observation of nature. *International Journal of Science Education*, 27, 655-677. <https://doi.org/10.1080/09500690500038116>
- Martín-Arbós, S., Castarlenas, E., & Dueñas, J.-M. (2021). Help-seeking in an academic context: A systematic review. *Sustainability*, 13(8), 4460. <https://doi.org/10.3390/su13084460>
- Mayer, R. E. (2004). Should there be a three-strikes rule against pure discovery learning? The case for guided methods of instruction. *Am Psychol*, 59(1), 14-19. <https://doi.org/10.1037/0003-066x.59.1.14>
- Mayr, E. (1982). *The growth of biological thought: Diversity, evolution, and inheritance*. Harvard University Press.
- Meyer, J. H. F., & Land, R. (2003). Threshold concepts and troublesome knowledge: Linkages to ways of thinking and practising within the disciplines. *Improving Student Learning - Ten Years on*, 412-424.
- Meyer, J. H. F., & Land, R. (2005). Threshold concepts and troublesome knowledge (2): Epistemological considerations and a conceptual framework for teaching and learning. *Higher Education*, 49(3), 373-388. <https://doi.org/10.1007/s10734-004-6779-5>
- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen. (2022). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen: Biologie*. Düsseldorf Abgerufen von https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/325/gost_klp_bi_2022_06_07.pdf
- Multon, K. D., Brown, S. D., & Lent, R. W. (1991). Relation of self-efficacy beliefs to academic outcomes: A meta-analytic investigation. *Journal of Counseling Psychology*, 38(1), 30-38. <https://doi.org/10.1037/0022-0167.38.1.30>
- Nadeau, C. P., & Urban, M. C. (2019). Eco-evolution on the edge during climate change. *Ecography*, 42(7), 1280-1297. <https://doi.org/10.1111/ecog.04404>
- Nadelson, L. S., & Southerland, S. (2012). A more fine-grained measure of students' acceptance of evolution: development of the inventory of student evolution acceptance – I-SEA. *International Journal of Science Education*, 34(11), 1637-1666. <https://doi.org/10.1080/09500693.2012.702235>
- Nadelson, L. S., & Southerland, S. A. (2009). Development and Preliminary Evaluation of the Measure of Understanding of Macroevolution: Introducing the MUM. *The Journal of Experimental Education*, 78(2), 151-190. <https://doi.org/10.1080/00220970903292983>

- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina. (2017). *Evolutionsbiologische Bildung in Schule und Hochschule. Bedeutung und Perspektiven*. Halle (Saale): Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. Nationale Akademie der Wissenschaften Abgerufen von https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2017_Stellungnahme_Evolutionsbiologie.pdf
- Nehm, R. H., Beggrow, E. P., Opfer, J. E., & Ha, M. (2012). Reasoning about natural selection: Diagnosing contextual competency using the ACORNS instrument. *The American Biology Teacher*, 74(2), 92-98. <https://doi.org/10.1525/abt.2012.74.2.6>
- Nehm, R. H., & Ha, M. (2011). Item feature effects in evolution assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(3), 237-256. <https://doi.org/10.1002/tea.20400>
- Nehm, R. H., Ha, M., Rector, M., Opfer, J. E., Perrin, L., Ridgway, J., & Molloyhan, K. (2010). *Scoring guide for the open response instrument (ORI) and evolutionary gain and loss test (EGALT)*. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.471.7384&rep=rep1&type=pdf>
- Nehm, R. H., & Reilly, L. (2007). Biology majors' knowledge and misconceptions of natural selection. *BioScience*, 57(3), 263-272. <https://doi.org/10.1641/b570311>
- Nelson, C. E., Scharmann, L. C., Beard, J., & Flammer, L. I. (2019). The nature of science as a foundation for fostering a better understanding of evolution. *Evolution: Education and Outreach*, 12(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s12052-019-0100-7>
- Neubrand, C., Borzikowsky, C., & Harms, U. (2016). Adaptive prompts for learning evolution with worked examples – Highlighting the students between the „novices“ and the „experts“ in a classroom. *International Journal of Environmental and Science Education*, 11, 6774-6795.
- Neubrand, C., & Harms, U. (2017). Tackling the difficulties in learning evolution: effects of adaptive self-explanation prompts. *Journal of Biological Education*, 51(4), 336-348. <https://doi.org/10.1080/00219266.2016.1233129>
- Newman, R. S. (1990). Children's help-seeking in the classroom: The role of motivational factors and attitudes. *Journal of educational psychology*, 82(1), 71–80. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.82.1.71>
- Novick, L. R., & Catley, K. M. (2013). Reasoning about evolution's Grand patterns: College students' understanding of the tree of life. *American Educational Research Journal*, 50(1), 138-177. <https://doi.org/10.3102/0002831212448209>
- Novick, L. R., & Catley, K. M. (2014). When relationships depicted diagrammatically conflict with prior knowledge: An investigation of students' interpretations of evolutionary trees. *Science Education*, 98(2), 269-304. <https://doi.org/10.1002/sce.21097>
- O'Hara, R. J. (1997). Population thinking and tree thinking in systematics. *Zoologica Scripta*, 26(4), 323-329. <https://doi.org/10.1111/j.1463-6409.1997.tb00422.x>
- Ohly, K.-P. (2012). Evolutionstheorie und Schöpfungslehre im Biologieunterricht. In D. C. Dreesmann, D. Graf, & K. Witte (Hrsg.), *Evolutionsbiologie: Moderne Themen für den Unterricht* (S. 485-503). Spektrum Akademischer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2786-1_17
- Opfer, J. E., Nehm, R. H., & Ha, M. (2012). Cognitive foundations for science assessment design: Knowing what students know about evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(6), 744-777. <https://doi.org/10.1002/tea.21028>

- Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2003). Cognitive Load Theory and instructional design: Recent developments. *Educational Psychologist*, 38(1), 1-4. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_1
- Paas, F., van Gog, T., & Sweller, J. (2010). Cognitive Load Theory: New conceptualizations, specifications, and integrated research perspectives. *Educational Psychology Review*, 22(2), 115-121. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9133-8>
- Park, H. J. (2007). Components of conceptual ecologies. *Research in Science Education*, 37(2), 217-237. <https://doi.org/10.1007/s11165-006-9023-8>
- Patel, V., Pauli, N., Biggs, E., Barbour, L., & Boruff, B. (2021). Why bees are critical for achieving sustainable development. *Ambio*, 50(1), 49-59. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01333-9>
- Prat-Sala, M., & Redford, P. (2010). The interplay between motivation, self-efficacy, and approaches to studying. *Br J Educ Psychol*, 80(2), 283–305. <https://doi.org/10.1348/000709909x480563>
- Prokop, P., Kubiato, M., & Fančovičová, J. (2008). Slovakian pupils' knowledge of, and attitudes toward, birds. *Anthrozoös*, 21(3), 221-235. <https://doi.org/10.2752/175303708X332035>
- Prokop, P., & Tunnicliffe, S. (2010). Effects of having pets at home on children's attitudes toward popular and unpopular animals. *Anthrozoös*, 23(1), 21-35. <https://doi.org/10.2752/175303710X12627079939107>
- Prokop, P., & Tunnicliffe, S. D. (2008). "Disgusting" animals: Primary school children's attitudes and myths of bats and spiders. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 4(2), 87-97. <https://doi.org/10.12973/ejmste/75309>
- Randler, C., & Wieland, L. (2010). Knowledge about common vertebrate species in German kindergarten pupils. *Journal of Baltic Science Education*, 9(2), 135-141.
- Reiss, K., & Renkl, A. (2002). Learning to prove: The idea of heuristic examples. *Zentralblatt für Didaktik der Mathematik*, 34(1), 29-35. <https://doi.org/10.1007/BF02655690>
- Roelle, J., & Berthold, K. (2013). The expertise reversal effect in prompting focused processing of instructional explanations. *Instructional Science*, 41(4), 635-656. <https://doi.org/10.1007/s11251-012-9247-0>
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2020). Intrinsic and extrinsic motivation from a self-determination theory perspective: Definitions, theory, practices, and future directions. *Contemporary Educational Psychology*, 61, 101860. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2020.101860>
- Sbeglia, G. C., & Nehm, R. H. (2018). Measuring evolution acceptance using the GAENE: influences of gender, race, degree-plan, and instruction. *Evolution: Education and Outreach*, 11(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s12052-018-0091-9>
- Schlegel, J., & Rupf, R. (2010). Attitudes towards potential animal flagship species in nature conservation: A survey among students of different educational institutions. *Journal for Nature Conservation*, 18(4), 278-290. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2009.12.002>
- Schmidt-Borcherding, F., Hänze, M., Wodzinski, R., & Rincke, K. (2013). Inquiring scaffolds in laboratory tasks: an instance of a "worked laboratory guide effect"? *European Journal of Psychology of Education*, 28(4), 1381–1395. <https://doi.org/10.1007/s10212-013-0171-8>

- Schmidt-Weigand, F., Franke-Braun, G., & Hänze, M. (2008). Erhöhen gestufte Lernhilfen die Effektivität von Lösungsbeispielen? *Unterrichtswissenschaft*, 36(4), 365–384.
- Schmidt-Weigand, F., Hänze, M., & Wodzinski, R. (2009). Complex problem solving and worked examples. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 23(2), 129–138. <https://doi.org/10.1024/1010-0652.23.2.129>
- Schneider, V. (2020). *Wirkungen des Protestantismus auf Einstellungen und Wertorientierungen. USA und Deutschland im Vergleich* (Erste Ausg.). Springer VS. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30654-0>
- Schramm, T. (2022). *Den Baum des Lebens verstehen: Modellierung der Fähigkeiten im Umgang mit evolutionären Stammbäumen* https://duepublico2.uni-due.de/servlets/MCRFileNodeServlet/duepublico_derivate_00075044/Diss_Schramm.pdf
- Schramm, T., & Schmiemann, P. (2019). Teleological pitfalls in reading evolutionary trees and ways to avoid them. *Evolution: Education and Outreach*, 12, 20. <https://doi.org/10.1186/s12052-019-0112-3>
- Silva, A., & Minor, E. S. (2017). Adolescents' experience and knowledge of, and attitudes toward, bees: Implications and recommendations for conservation. *Anthrozoös*, 30(1), 19-32. <https://doi.org/10.1080/08927936.2017.1270587>
- Sinatra, G. M., Southerland, S. A., McConaughy, F., & Demastes, J. W. (2003). Intentions and beliefs in students' understanding and acceptance of biological evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(5), 510-528. <https://doi.org/10.1002/tea.10087>
- Siviter, H., Bailes, E. J., Martin, C. D., Oliver, T. R., Koricheva, J., Leadbeater, E., & Brown, M. J. F. (2021). Agrochemicals interact synergistically to increase bee mortality. *Nature*, 596(7872), 389-392. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03787-7>
- Smith, M. U. (2010). Current status of research in teaching and learning evolution: II. Pedagogical issues. *Science & Education*, 19(6), 539-571. <https://doi.org/10.1007/s11191-009-9216-4>
- Smith, M. U., & Siegel, H. (2016). On the relationship between belief and acceptance of evolution as goals of evolution education. *Science & Education*, 25(5), 473-496. <https://doi.org/10.1007/s11191-016-9836-4>
- Southerland, S. A., & Scharmann, L. C. (2013). Acknowledging the religious beliefs students bring into the science classroom: Using the bounded nature of science. *Theory Into Practice*, 52(1), 59-65. <https://doi.org/10.1080/07351690.2013.743778>
- Stiller, C., & Wilde, M. (2023). Full-structured or supported by incremental scaffolds? Effects on perceived competence and motivation. *The Journal of Experimental Education*, 1–22. <https://doi.org/10.1080/00220973.2023.2269128>
- Sweller, J. (2010). Element interactivity and intrinsic, extraneous, and germane cognitive load. *Educational Psychology Review*, 22(2), 123-138. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9128-5>
- Tibell, L. A. E., & Harms, U. (2017). Biological principles and threshold concepts for understanding natural selection. *Science & Education*, 26(7), 953-973. <https://doi.org/10.1007/s11191-017-9935-x>
- Tikka, P. M., T., K. M., & Tynys, S. M. (2000). Effects of educational background on students' attitudes, activity Levels, and knowledge concerning the environment. *The Journal of Environmental Education*, 31(3), 12-19. <https://doi.org/10.1080/00958960009598640>

- Tinajero, C., Mayo, M. E., Villar, E., & Martínez-López, Z. (2024). Classic and modern models of self-regulated learning: integrative and componential analysis. *Frontiers in Psychology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1307574>
- Truong, J. M., Barnes, M. E., & Brownell, S. E. (2018). Can six minutes of culturally competent evolution education reduce students' level of perceived conflict between evolution and religion? *The American Biology Teacher*, 80(2), 106-115. <https://doi.org/10.1525/abt.2018.80.2.106>
- UNRIC. (2024). *17 Ziele für nachhaltige Entwicklung*. Regionales Informationszentrum der Vereinten Nationen für Westeuropa. <https://unric.org/de/17ziele/>
- Unsworth, A., & Voas, D. (2018). Attitudes to evolution among Christians, Muslims and the Non-Religious in Britain: differential effects of religious and educational factors. *Public Understanding of Science*, 27(1), 76-93. <https://doi.org/10.1177/0963662517735430>
- Unsworth, A., & Voas, D. (2021). The Dawkins effect? Celebrity scientists, (non)religious publics and changed attitudes to evolution. *Public Understanding of Science*, 30(4), 434-454. <https://doi.org/10.1177/0963662521989513>
- Vanderstock, A., Grandi-Nagashiro, C., Kudo, G., Latty, T., Nakamura, S., White, T. E., & Soga, M. (2022). For the love of insects: gardening grows positive emotions (biophilia) towards invertebrates. *Journal of Insect Conservation*, 26(5), 751-762. <https://doi.org/10.1007/s10841-022-00419-x>
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in Society: Development of Higher Psychological Processes* (M. Cole, V. Jolm-Steiner, S. Scribner, & E. Souberman, Hrsg.). Harvard University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctvjf9vz4>
- Waschke, T., & Lammers, C. (2012). Evolutionstheorie im Biologieunterricht – (k)ein Thema wie jedes andere? In D. C. Dreesmann, D. Graf, & K. Witte (Hrsg.), *Evolutionsbiologie: Moderne Themen für den Unterricht* (S. 505-534). Spektrum Akademischer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2786-1_18
- Weinberg, R. S., Gould, D., & Jackson, A. (1979). Expectations and performance: An empirical test of Bandura's self-efficacy theory. *Journal of Sport Psychology*, 1(4), 320–331.
- Wiens, J. J., Litvinenko, Y., Harris, L., & Jezkova, T. (2019). Rapid niche shifts in introduced species can be a million times faster than changes among native species and ten times faster than climate change. *Journal of Biogeography*, 46(9), 2115-2125. <https://doi.org/10.1111/jbi.13649>
- WWF. (2018). *Living Planet Report - 2018: Aiming Higher*. https://c402277.ssl.cf1.rackcdn.com/publications/1187/files/original/LPR2018_Full_Report_Spreads.pdf

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer für die fachliche Begleitung während der verschiedenen Phasen meiner Dissertationsprojekte. Seine konstruktiven Anregungen, ausführlichen Rückmeldungen und die stets offene Gesprächsbereitschaft haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ein weiterer Dank richtet sich an die Graduiertenschule für LehrerInnenbildung für die überfachliche Betreuung sowie die Ermöglichung dieser Promotion durch die Einrichtung und Finanzierung meiner Qualifikationsstelle.

Zudem danke ich meinen Mitautor:innen für die konstruktive Zusammenarbeit und die Einbringung ihrer fachlichen Expertise, mit der sie meine Projekte bereichert haben. Ebenso danke ich meinen Kolleg:innen am Institut für die gegenseitige Unterstützung und den fachlichen Austausch, insbesondere im Rahmen der Lehre und des Doktorierendenkolloquiums.

Diese Arbeit wäre ohne die Studienteilnehmenden nicht möglich. Ich danke allen Beteiligten für das entgegengebrachte Vertrauen in meine Arbeit.

Besonders herzlich danke ich meiner Familie, meinen Freund:innen und meinem Partner für ihre langjährige Unterstützung. Ihr Rückhalt und ihre Zuversicht haben mich während des gesamten Promotionsprozesses begleitet und mich auch in anspruchsvollen Phasen gestärkt.

Zum Schluss danke ich meinen Eltern, die mich in all meinen Entscheidungen unterstützt und stets an mich geglaubt haben. Ohne sie wäre dieser Weg nicht möglich gewesen.