



Instruktionen kohärent anlegen und Kompetenzaufbau untersuchen: Zugänge und Herausforderungen am Beispiel experimentbezogener Kompetenz

Andreas Vorholzer · Jörn Jonathan Hägele · Claudia von Aufschnaiter

Online publiziert: 20. Januar 2020

© Die Herausgeber und Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Zusammenfassung Instruktionale Kohärenz ist nicht nur für den fachinhaltlichen und fachmethodischen Kompetenzaufbau (z. B. zum experimentellen Arbeiten) zentral, sondern auch wichtig, um Mechanismen des Kompetenzaufbaus untersuchen zu können. Dem Beitrag liegt ein Projekt zugrunde, in dem theoretische Überlegungen und empirische Befunde zu fachlichen Lernprozessen als Ausgangspunkte für die Sequenzierung einer Instruktion genutzt wurden, die auf den Aufbau experimentbezogener Kompetenz (Formulieren von Fragen und Hypothesen, Planen von Untersuchungen, Auswerten und Interpretieren von Daten) abzielt. Die Instruktion hat eine Gesamtdauer von fünf Schulstunden und wurde im Physikunterricht von 12 Klassen der Einführungsphase eingesetzt. Zur Untersuchung des Kompetenzaufbaus und der Wirkung der Instruktion wurden vor und nach der Instruktion schriftliche Testinstrumente eingesetzt und Videoaufzeichnungen von Schüler*innen während des Bearbeitungsprozesses erhoben. Der Fokus des Beitrags liegt auf der Darstellung von zwei videogestützten Zugängen zur Erfassung des Kompetenzaufbaus (kategoriegestützte Erfassung von Aktivitäten, qualitativ-inhaltsanalytische Erfassung von individuellen Verständnissen). Exemplarische Analyseergebnisse werden genutzt, um insbesondere die Herausforderungen der wechselseitigen Bezugnahme zwischen diesen Zugängen und dem testbasierten Zugang zu diskutieren: Auf der Basis des Prä-Post-Vergleichs zeigt sich zwar, dass die Instruktion zum Kompetenzaufbau der Schüler*innen beiträgt, gleichzeitig zeigen sich in den videogestützten Analysen

A. Vorholzer (✉) · J. J. Hägele · C. von Aufschnaiter
Institut für Didaktik der Physik, Justus-Liebig-Universität Gießen,
Karl-Glöckner-Str. 21C, 35394 Gießen, Deutschland
E-Mail: avorholzer@jlug.de

J. J. Hägele
E-Mail: Joern.J.Haegele@didaktik.physik.uni-giessen.de

C. von Aufschnaiter
E-Mail: cvaufschnaiter@jlug.de

aber z.B. auch für Gruppen mit ähnlichem Kompetenzzuwachs z. T. deutliche Unterschiede in den Aktivitäten. Es lassen sich somit zwar vermittelt über die Testung Hinweise auf die Kohärenz der Instruktion identifizieren, ein systematischer Zusammenhang zwischen dem im Prä-Post-Vergleich ermittelten Kompetenzzuwachs und den kategorial erfassten Aktivitäten sowie den rekonstruierten individuellen Verständnisentwicklungen lässt sich jedoch nicht herstellen.

Schlüsselwörter Kompetenzentwicklung · Kompetenzaufbau · Progression · Kohärente Instruktion · Videoanalyse · Experimentbezogene Kompetenz

Construction of coherent instruction and investigation of competence development: Approaches and challenges exemplified with experiment related competence

Abstract Adapting instruction to students' prior knowledge and skills is relevant to foster students' learning of science content as well as their learning of scientific practices (such as conducting an experiment) successfully. Developing such coherent instructions is also important because it allows to investigate the mechanisms by which students' competences develop and improve. In the study presented in this paper, we used theoretical considerations and empirical evidence about students' learning to develop a sequenced instruction that aims at fostering students' experiment-related competence (formulating questions and hypotheses, planning investigations, analyzing and interpreting data). The instruction has a total duration of five school lessons and was administered to 12 upper secondary classes during their regular physics lessons. Pre-Post-test measures and video recordings during instruction were used to investigate how experiment-related competence is developed and how the instruction is used by the students. The paper focuses on the two different video-based approaches employed to analyze the development of students' competence (category-based analyses of activities and qualitative content analyses of the conceptions of individual students). Based on exemplary results, we discuss several challenges of connecting these approaches with the results from the written test. For instance, the results of the written tests suggest that the instruction has a significant impact on students' experimental competence, whereas the video data shows that even groups with a similar increase in competence vary considerably in their activities. Therefore, based on the test results, we have some indications for the coherence of our instruction, but at the same time we are not able to identify a clear relationship between students' pre to post competence increase and their activity patterns or the development of their individual conceptions.

Keywords Development of competence · Learning progression · Instructional coherence · Video analysis · Experiment-related competence

1 Einleitung

Ein wesentliches Ziel bei der Konstruktion von Lernangeboten ist es, diese so anzulegen, dass sie (individuellen) Kompetenzaufbau möglichst gut unterstützen. Eine zentrale Annahme dabei ist, dass es auf die Passung der Angebote zum aktuellen Lernstand ankommt, um den Kompetenzaufbau in angemessen kleinen Schritten von einem Zwischenzustand im Lernprozess zum nächsten anzulegen (z. B. Konzept der „zone of proximal development“ bei Vygotsky 1978). Der Konstruktion einer in diesem Sinne passenden – kohärenten – Instruktion liegen (idealerweise) empirisch fundierte Progressionsmodelle zugrunde, die den im Zuge des Kompetenzaufbaus stattfindenden Fortschritt der Lernenden beschreiben. Gleichzeitig stellen kohärente Instruktionen eine wesentliche Voraussetzung für die empirische Fundierung solcher Progressionsmodelle dar, da sie den Aufbau der zu erfassenden Kompetenzen optimal anregen und somit (besser) empirischen Untersuchungen zugänglich machen.

Das hier beschriebene Spannungsfeld, in dem kohärente Instruktion zu einem Inhaltsbereich konstruiert werden soll, zu dem gleichzeitig noch wenig empirisch gesicherte Hinweise auf Kompetenzprogression vorliegen, stellt einen zentralen Ausgangspunkt unserer Arbeit dar. Am von uns adressierten Aufbau *experimentbezogener Kompetenz* (Fragen und Hypothesen formulieren, Untersuchungen planen, Daten auswerten; vgl. Emden und Sumfleth 2016) zeigen wir im ersten Teil des Beitrags, wie wir Kompetenzprogression zunächst losgelöst von einem konkreten Inhalt oder Kompetenzbereich modellieren und diese Modellierung mit Annahmen und Befunden zum fachbezogenen Lernen verbinden, um eine kohärente Instruktion zu konstruieren. Dem Beitrag liegt ein Forschungsvorhaben zugrunde, dessen Ziel es u. a. ist, die Wirkung zweier unterschiedlicher Instruktionsansätze auf den Aufbau experimentbezogener Kompetenz in einem quasi-experimentellen Prä-Post-Design zu vergleichen (Vorholzer 2016; Vorholzer et al. 2018). Im zweiten Teil des Beitrags fokussieren wir auf einen Ausschnitt aus diesem Vorhaben, in dem wir den Kompetenzaufbau von Schüler*innen analysieren, die den effektiveren Instruktionsansatz erhalten haben. Wir verfolgen darin die Frage, wie der Kompetenzaufbau im Prozess der Auseinandersetzung mit der Instruktion (Aufgaben, Informationen etc.) nachvollzogen werden kann. Dazu wird illustriert, wie mit unterschiedlichen Analyseverfahren individuelle Aktivitäten und Verständnisentwicklungen anhand der Prozessdaten erfasst und mit der gemessenen Veränderung von Kompetenz (Prä-Post-Testung) in Beziehung gesetzt werden können. Wir gehen darin auch der Frage nach, inwieweit sich die Angemessenheit der in die Instruktion hineingesteckten Konstruktionsüberlegungen zur Herstellung von Kohärenz mit unserem methodischen Vorgehen nachweisen lässt.

2 Stand der Forschung: Kompetenzbegriff und Annahmen zu Kompetenzprogressionen

Ein erster Blick auf die begriffliche Fassung von Kompetenz in der Literatur¹ zeigt vergleichsweise große Einigkeit in drei zentralen Punkten:

1. Kompetenzen beschreiben „die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, um die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können“ (Weinert 2001, S. 27 f.; vgl. auch Diskussion in Hartig und Klieme 2006; Klieme et al. 2007). Der Schwerpunkt vorliegender Forschungsarbeiten liegt (immer noch) auf dem kognitiven Bereich von Kompetenz, obwohl sich in aktuellen Modellierungen von Kompetenz auch motivational-volitionale Aspekte finden lassen (z. B. Blömeke et al. 2015).
2. Es wird üblicherweise davon ausgegangen – jedoch nicht immer explizit formuliert –, dass Wissen, z. B. über fachliche Konzepte, Fakten oder Benennungen, Bestandteil von Kompetenz ist (vgl. Klieme et al. 2007; von Aufschnaiter und Hofmann 2014; Weinert 2000).
3. Kompetenzen werden häufig als themenübergreifend, aber domänenspezifisch (z. B. für die Domäne Physik) modelliert und können so von allgemeinen Konstrukten wie Intelligenz und Schlüsselqualifikationen abgegrenzt werden (z. B. Hartig und Klieme 2006).

Bei genauer Betrachtung der drei Punkte wird deutlich, dass mit der Einigkeit eine gewisse Unschärfe einhergeht, die sich auch auf Fragen der Modellierung von Progression und der Gestaltung von kohärenten Instruktionen auswirken kann. Unter der Annahme, dass Kompetenzen mindestens (a) Wissen, (b) kognitive Fähigkeiten und (c) Bereitschaften umfassen, müssten Modellierungen von kognitiven Kompetenzaspekten mindestens zwischen (a) und (b) systematisch unterscheiden und *beides* – auch in der Wechselwirkung – in den Blick nehmen. Die Betrachtung dieser Wechselwirkung ist einerseits entscheidend, da das zielgerichtete Entfalten von Fähigkeiten immer Wissen erfordert. Beispielsweise kann die Planung eines „fairen“ Experimentes nicht ohne ein Verständnis von Variablenkontrolle gelingen und das richtige Umstellen von Gleichungen ist nicht möglich, wenn Lernende nicht wissen, dass jede Rechenoperation „auf beiden Seiten“ der Gleichung ausgeführt werden muss. Andererseits kann Wissen ohne Fähigkeiten nicht existieren, denn es muss mindestens die Fähigkeit zur Wiedergabe vorhanden sein. Der Zusammenhang von Wissen und Fähigkeit ist zentral für die Planung von kohärenten Instruktionen (vgl. Abschn. 3; s. a. von Aufschnaiter und Hofmann 2014): Welches Wissen muss aufgebaut werden, um Voraussetzungen für Fähigkeiten zu schaffen? Der Zusammenhang ist auch für Testungen von großer Bedeutung: Unter der Annahme, dass Lernende

¹ Wir fassen den Stand der Forschung nur sehr knapp zusammen, um unsere eigene Arbeit darin zu verorten. Eine ausführlichere Darstellung des Forschungsstandes findet sich u. a. in Hartig und Klieme (2006), Schecker und Parchmann (2006) und Ufer und Neumann (2018).

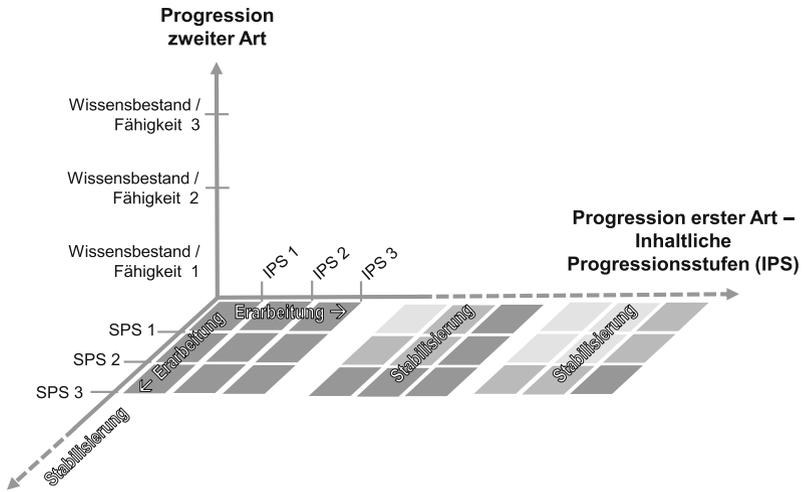
über bestimmtes Wissen verfügen, was sollten sie dann damit „hinbekommen“?² Der zentralen Rolle des Zusammenhangs von Wissen und Fähigkeiten werden übliche Modellierungen von Kompetenz kaum gerecht, da sie typischerweise nur einen der beiden Aspekte adressieren (vgl. auch Vorholzer und von Aufschnaiter **im Druck**; Vorholzer et al. 2016).

Einigkeit findet sich auch in Überlegungen zu den Zwecken von Kompetenzmodellen (vgl. Schecker und Parchmann 2006). Sie können (i) der Beschreibung unterschiedlicher *Ausprägungen* einer Kompetenz dienen (z. B. Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung als Ausprägungen naturwissenschaftlicher Kompetenz; KMK 2005), (ii) *Niveaus* von Kompetenz modellieren, um qualitative Kompetenzunterschiede zu beschreiben, die aber nicht zwingend in dieser Reihenfolge im Lernen aufgebaut werden (z. B. Komplexitätsniveaus *1 Fakt, 2 Fakten, 1 Zusammenhang* usw. in Wellnitz et al. 2012), und (iii) *Stufen* beschreiben, von denen angenommen wird, dass sie im individuellen Lernen nacheinander durchlaufen werden. Insbesondere Modellierungen, die sich auf Stufungen richten (iii), und damit Aussagen über Individuen machen, werden in der empirischen Forschung gegenwärtig überwiegend aus Querschnitten mit unterschiedlich fortgeschrittenen Lernern konstruiert (z. B. Arbeiten von Neumann et al. 2013; vgl. auch die Kritik an dieser Forschungsrichtung in Renkl 2012). Die Gestaltung kohärenter Instruktion erfordert jedoch (auch) empirische Evidenz zu der von *Individuen* durchlaufenen Kompetenzentwicklung, weil nur dann gewährleistet werden kann, dass sich Passung im Lernprozess einstellt. Wir benutzen für Modelle, die Fortschritt im individuellen Kompetenzaufbau abbilden sollen, den Begriff *Progressionsmodell*, um Verwechslung mit Modellierungen von Niveaus (ii) zu vermeiden und an das Konstrukt der *Learning Progressions* anzuknüpfen (u. a. Alonzo 2012).

In der Literatur lassen sich vielfältige Ansätze zur Modellierung und Beschreibung von Progression identifizieren (z. B. Gut et al. 2014; Schecker und Parchmann 2006). Innerhalb dieser Vielfalt können aus unserer Sicht zwei Arten von Progressionen unterschieden werden, welche jeweils mit spezifischen Implikationen für die Anlage von kohärenter Instruktion verknüpft sind. *Progressionen erster Art* beschreiben den Prozess, in dem eine spezifische Fähigkeit (z. B. das Argumentieren, Osborne et al. 2016) bzw. ein spezifischer Wissensbestand (z. B. zu Energieformen oder zum Energietransfer, z. B. Neumann et al. 2013) erstmalig aufgebaut und in Wiederholungen stabilisiert wird. Am Ende einer Progression erster Art können die Lernenden eine bestimmte Fähigkeit bzw. ein Verständnis inhaltlich angemessen bzw. auf einem intendierten strukturellen Niveau relativ stabil (re)produzieren.

In Modellierungen, die wir der ersten Art zuordnen, können wir zwei unterschiedliche Herangehensweisen ausmachen: Es wird entweder der *inhaltliche Fortschritt* der jeweils adressierten Fähigkeit bzw. des Wissensbestandes beschrieben (y-Achse in Abb. 1, Achsenbezeichnung im Sinne eines rechtshändigen Koordinatensystems), oder der *strukturelle Fortschritt*, d. h., die Art und Weise, wie sich die Fähigkeit/der

² Wir betonen, dass diese Überlegung zum Übergang von Wissen zu Fähigkeiten *nicht* identisch ist mit der Integration von Wissen in Stammtexten zu Testaufgaben (vgl. Beispiele in Ropohl et al. 2015). Wird z. B. verlangt, einen Sachverhalt zu erklären, wird dort ggf. alles formuliert, was erklärt werden soll, jedoch nicht, nach welchen Regeln eine Erklärung „gut“ ist.



Progression erster Art – Strukturelle Progressionsstufen (SPS)

Abb. 1 Heuristisches Modell zu Unterscheidung von Progressionen erster und zweiter Art. Die unterschiedlichen *Graustufen* der Flächen in der x-y-Ebene sind ein Maß dafür, in welchem Umfang eine bestimmte inhaltliche bzw. strukturelle Progressionsstufe im Zuge der Erarbeitung und Stabilisierung entsteht (je *dunkler* desto häufiger)

Wissensbestand aufbaut (x-Achse in Abb. 1). Beide Arten des Fortschritts können auch kombiniert betrachtet werden, was wir über Flächen in der x-y-Ebene in Abb. 1 angedeutet haben. Entlang der y-Achse beschreiben z. B. Alonzo und von Aufschneider (2018) Progressionsstufen zum inhaltlichen Fortschritt im Verständnis von Bewegungen ausgehend von der Schülervorstellung, dass Objekte einen natürlichen Bewegungszustand haben, über die Vorstellung, dass einem Bewegungszustand eine Geschwindigkeit als Tempo zugeordnet werden kann, bis hin zum Verständnis, dass Geschwindigkeit Betrag und Richtung hat sowie deren Änderung auf eine Beschleunigung (ebenfalls mit Betrag und Richtung) verweist (ähnliche Modellierungen des inhaltlichen Fortschritts des Verständnisses z. B. in Hadenfeldt und Neumann 2012). Bezogen auf eine Fähigkeit kann inhaltlicher Fortschritt (ebenfalls y-Achse in Abb. 1) z. B. dadurch modelliert werden, dass Schüler*innen immer komplexere Probleme lösen (z. B. Argumente mit mehr Elementen und mehr Vernetzung konstruieren; Osborne et al. 2016; s. a. „Problemkomplexität“ in Gut et al. 2014, S. 2) oder Probleme immer eigenständiger („Eigenständigkeit“) oder stabiler lösen („Performanzstabilität“; Gut et al. 2014, S. 2). Modellierungen von strukturellen Progressionsstufen zu einer Fähigkeit/einem Wissensbestand (x-Achse in Abb. 1) beziehen sich z. B. auf das Fortschreiten des Konzeptualisierungsniveaus (von Fall über intuitiv regelbasiert zu expliziert regelbasiert, u. a. von Aufschneider und Rogge 2010a, 2010b) oder den Aufbau eines systemischen Verständnisses ausgehend von Fakten über Verbindungen und anschließend Relationen (Yao et al. 2017).

Progressionen erster Art können in der ersten Erarbeitung vergleichsweise zügig erfolgen (einzelne oder mehrere, meist aufeinander folgende Schulstunden), sich

aber auch über lange Zeiträume erstrecken und darin auch Rückschritte im Vergleich zu einem zuvor erreichten „semi-stabilen“ Zustand enthalten (z.B., wenn ein bestimmter Wissensbestand nach einem Jahr erneut aktiviert wird). Die Progressionen erster Art dauern auch deshalb u.U. lange, weil die Stabilisierung des intendierten Endzustandes mehrfache und ggf. deutlich zeitlich versetzte Möglichkeiten des Wiederholens erfordern, weshalb der „eindeutige“ Fortschritt empirisch schwer nachweisbar sein kann (vgl. entsprechende Befunde und Annahmen der Conceptual-Change-Forschung zur Veränderung des Status von lebensweltlichen und wissenschaftlichen Vorstellungen, z. B. Duit und Treagust 2003).

Progressionen zweiter Art beschreiben den Prozess, in dem Fähigkeiten bzw. Wissensbestände schrittweise *erweitert* werden (z-Achse in Abb. 1). Die Erweiterung kann z. B. darin bestehen, dass von den Lernenden zusätzliche Fähigkeiten oder Wissensbestände aufgebaut und diese ggf. mit vorher entwickelten Fähigkeiten/Wissensbeständen vernetzt werden. Damit geht häufig einher, dass mehr Situationsklassen bewältigt bzw. Wissensbestände in einem verbreiterten Verständnis subsumiert werden können. In diesem Sinne ist auch die Zusammenführung von zunächst unabhängig voneinander konstruierten Wissensbeständen eine Progression zweiter Art. Eine Beispiel hierfür bildet die von Alonzo und von Aufschnaiter (2018) beschriebene Zusammenführung von zwei Progressionen erster Art – eine zu Kraft und eine zu Bewegung – zu einer Progression zweiter Art, die deren Vernetzung beschreibt (Bewegung und Kraft sind faktisch das Gleiche → Kraft ist proportional zur Bewegung → Kraft ist proportional zur Geschwindigkeit → Kraft ist proportional zur Änderung der Geschwindigkeit bzw. zur Beschleunigung). Yao et al. (2017) deuten eine solche Progression an, indem sie für Energie die Formen, den Transfer, die Entwertung und die Erhaltung aufsteigend anordnen. Ein auf Fähigkeiten bezogenes Beispiel für eine Progression zweiter Art liefert das ESNaS Kompetenzmodell, das als aufeinander folgende kognitiven Prozesse „reproduzieren“, „selegieren“, „organisieren“, und „integrieren“ beschreibt (Wellnitz et al. 2012, S. 270). Auch die von Gut et al. (2014) als Steigerung des Transfervermögens bezeichnete „Richtung“ (S. 2) der Kompetenzprogression lässt sich im Sinne einer Progression zweiter Art deuten.

Die Unterscheidung zwischen Progressionen erster und zweiter Art ist eine für die Konstruktion kohärenter Instruktion hilfreiche Heuristik, weil wir davon ausgehen, dass gelingende Progressionen erster Art eine notwendige Voraussetzung für Progressionen zweiter Art darstellen. Hierbei ist zu bedenken, dass Progressionen erster und zweiter Art nicht streng nacheinander erfolgen, sondern miteinander verzahnt sein können (vgl. entsprechend angeordnete Abbildungen in Neumann et al. (2013, S. 169) bzw. Yao et al. (2017, S. 2367)) und dass der Fortschritt entlang der modellierten Achse(n) nicht streng linear verläuft (z. B. von Aufschnaiter und Rogge 2010a, 2010b). Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die Antwort auf die Frage, ob ein bestimmtes Modell eine Progression erster oder zweiter Art beschreibt, auch davon abhängt, was jeweils als *eine* Fähigkeit bzw. *ein* Wissensbestand betrachtet wird (Aspekt der *grain size*). Im Modell von Yao et al. (2017, S. 2365) haben wir das Fortschreiten von „fact-mapping-relation-systemic“ der strukturellen Achse (x-Achse, Abb. 1) der Progression erster Art zugeordnet, obwohl die Beschreibung der Autoren von „relation“ und „systemic“ die Vernetzung von Konzepten und die

Verbreiterung auf verschiedene Kontexte beinhaltet. In unserer Annahme, dass es sich in jedem der vier modellierten Wissensbestände (Formen, Transfer, Entwertung und Enthaltung) um jeweils *einen* Wissensbestand handelt, ist die Vernetzung von darunter subsumierten Konzepten und der Übertrag auf verschiedene Kontexte Bestandteil des jeweiligen Wissensbestandes, weshalb wir von einer Progression erster Art ausgehen. Für den Aufbau *jedes* in einem Wissensbestand enthaltenen Konzeptes würde die x-Achse jedoch zumindest zum Teil eine Progression zweiter Art modellieren, weil Konzepte zunehmend miteinander vernetzt, das Verständnis also erweitert wird. Damit wird auch deutlich, dass die von uns eindeutig der Progression erster Art zugeordnete strukturelle x-Achse „fluid“ ist und je nach betrachteter grain size auch eine Progression zweiter Art beschreiben kann (ggf. also vier Dimensionen modelliert werden müssten).

3 Konzeptionelle Überlegungen zur Entwicklung kohärenter Instruktion

Die Herstellung kohärenter Instruktion erfordert im Kern, einen *fachlichen Gegenstand* so zu sequenzieren, dass sowohl den *Lernvoraussetzungen* der Schüler*innen (z. B. Schülervorstellungen) als auch den empirisch nachgewiesenen bzw. theoretisch modellierten *Annahmen zur Progression* erster und zweiter Art Rechnung getragen wird. Diese Art der wechselseitigen Bezugnahme einer fachlichen Perspektive und einer auf die Lernenden gerichteten Perspektive mit dem Ziel der didaktischen Strukturierung von Instruktion wird im Modell der didaktischen Rekonstruktion beschrieben (z. B. Duit et al. 2012), welches das konzeptionelle Fundament für die Entwicklung unserer Instruktionen darstellt (vgl. Vorholzer 2016, im Druck).

In Anlehnung an das Modell der Didaktischen Rekonstruktion haben wir zunächst den *Gegenstand* unserer Instruktion – experimentbezogene Kompetenz – geklärt. Dabei wurde in einem ersten Schritt erfasst, wie experimentbezogenen Kompetenz üblicherweise modelliert wird (zsf. z. B. in Emden und Sumfleth 2016) und daraus drei für die Instruktion zentrale Teilkompetenzen rekonstruiert: *Fragen und Hypothesen formulieren (FH)*, *Untersuchungen planen (UP)* sowie *Daten auswerten und interpretieren (AI)*. In einem zweiten Schritt wurden die fachmethodischen Fähigkeiten zu diesen Teilkompetenzen erfasst und die jeweils zugehörigen Wissensbestände als „fachmethodische Konzepte“ (Verallgemeinerungen)³ formuliert. In Tab. 1 sind für die Teilkompetenz FH exemplarisch Fähigkeiten und Konzepte aufgelistet, deren Kenntnis wesentlich für eine zielgerichtete – nicht nur zufällige – Entfaltung der Fähigkeiten ist (umfassend in Vorholzer 2016; Vorholzer et al. 2016). Deutlich wird dies z. B. im Kontext des Stellens von Fragen: Es handelt sich zunächst um eine alltägliche Fähigkeit, die keine besonderen Konzepte zu benötigen scheint. Das zielgerichtete Stellen einer *naturwissenschaftlichen* (und nicht nur irgendeiner) Frage, erfordert aber, dass bekannt ist, was das Spezifische an naturwissenschaftlichen Fra-

³ Fachmethodische Konzepte können begrifflich auch als Wissen über Handlungs-/Verhaltensstrategien oder als prozedurales Wissen gefasst werden.

Tab. 1 Exemplarische Darstellung von Fähigkeiten und zugehörigen Konzepten zur Teilkompetenz FH

<i>Fähigkeiten</i>	Die Schüler*innen formulieren präzise naturwissenschaftliche Fragestellungen. ... formulieren zu einer naturwissenschaftlichen Fragestellung passende Vermutungen oder Hypothesen.
<i>Konzepte</i>	Ein zentrales Merkmal einer naturwissenschaftlichen Frage ist, dass sie mit naturwissenschaftlichen Methoden (z. B. Messung, Zählung, Beobachtung objektivierbarer Ereignisse) untersucht werden kann. Eine naturwissenschaftliche Frage sollte immer möglichst präzise formuliert werden, d. h. möglichst genau festlegen, welches Merkmal verändert und welches Merkmal beobachtet werden soll. Vorhersagen über den Ausgang einer Untersuchung sollten nur formuliert werden, wenn man sie sinnvoll begründen kann und sie nicht geraten sind. Bei Vorhersagen wird zwischen Vermutungen (Begründung basiert auf phänomenologischen Vorerfahrungen) und Hypothesen (Begründung basiert auf theoretisch verallgemeinernden Vorerfahrungen) unterschieden. Eine Vermutung/Hypothese muss zur Fragestellung „passen“, d. h. eine Vorhersage über den im Rahmen der Fragestellung zu untersuchenden Zusammenhang treffen.

gen ist, bzw. warum eine Frage der Art „Schmeckt Mineralwasser mit Kohlensäure besser als ohne Kohlensäure?“ nicht naturwissenschaftlich ist.

Die Erfassung der *Schülerperspektive* bildete den zweiten zentralen Ausgangspunkt für die Vorbereitung der Sequenzierung. Wir haben sowohl Befundlagen zu Schülervorstellungen (im Sinne von Konzepten) und Kompetenzen zum Experimentieren zusammengestellt (u. a. aus Hammann et al. 2006) als auch Kompetenzmodelle und zugehörige Befunde (u. a. aus Grube 2011; Wellnitz et al. 2012) gesichtet. Zudem wurden Überlegungen der fachbezogenen Lehr-/Lernforschung gesichtet und zusammengefasst, die Ansatzpunkte für die Gestaltung lernförderlicher Instruktionen liefern (z. B. zum Umgang mit Schülervorstellungen und zum Aufbau fachlicher Konzepte, vgl. u. a. von Aufschnaiter und Rogge 2010a, 2010b, 2012; Duit und Treagust 1998).

Die in diesen beiden Schritten entstandenen Überlegungen wurden vor dem Hintergrund des mit der Schule für die Instruktionsdauer vereinbarten Zeitfensters, eine Einzel- und zwei Doppelstunden im Abstand von je einer Woche (s. unten), zusammengeführt (ausführlich in Vorholzer 2016). Dabei wurden Teilkompetenzen und Konzepte ausgewählt, die fachlich von großer Relevanz sind und bei denen auf der Basis der verfügbaren Befundlagen (und Modellierungen) davon auszugehen ist, dass die anvisierte Altersgruppe – Schüler*innen der Einführungsphase – sie nicht oder nicht hinreichend beherrschen (z. B. Identifikation und Kontrolle von Variablen, vgl. Arnold et al. 2014).

Der Aufbau experimentbezogener Kompetenz findet immer in einem fachinhaltlichen Kontext statt, z. B. weil Fragestellungen und Hypothesen zu einem bestimmten Phänomen formuliert, oder Experimente zur Untersuchung einer bestimmten Gesetzmäßigkeit geplant werden. Wir haben deshalb die oben genannten Schritte auch für das von den Lehrkräften anvisierte Themenfeld Mechanik durchlaufen, um dort fachliche Inhalte auszuwählen, die den Schüler*innen gut vertraut sein sollten und auch auf fachlich niedrigem Niveau bearbeiten werden können, damit der angestrebte Aufbau fachmethodischer Kompetenz nicht von ge- bzw. misslingenden fachinhalt-

lichen Lernprozessen oder fehlender fachinhaltlicher Kompetenz beeinflusst wird (vgl. ausführlich in Vorholzer 2016, im Druck).

3.1 Progression zweiter Art: Sequenzierung von Lernzielen

Um eine kohärente Instruktion zu entwickeln, wurde zunächst die Progression zweiter Art in den Blick genommen und darauf bezogen eine Reihung der nacheinander aufzubauenden Fähigkeiten und zugehörigen Konzepte vorgenommen (vgl. Tab. 1). Die *Teilkompetenzen* wurden entlang der verschiedenen Schritte eines (idealiserten) Prozesses der Erkenntnisgewinnung angelegt (erst FH, dann UP, danach AI), was auch aus lernlogischer Sicht plausibel scheint; die Lernenden sollen nicht nur zur sachangemessenen Umsetzung der einzelnen Schritte selbst, sondern auch zur Herstellung wechselseitiger Passung zwischen den Schritten (geplante Experimente müssen die Untersuchung der Forschungsfragen erlauben usw.) befähigt werden. In ähnlicher Weise werden in jeder Teilkompetenz *Fähigkeiten*, die auf die Herstellung von Passung gerichtet sind, später thematisiert (in Tab. 1 exemplarisch von oben nach unten).

In der Sequenzierung der zu einer Fähigkeit thematisierten *Konzepte* wurde geklärt, welche Konzepte für die Lernenden eher naheliegend sind, weil dazu anschlussfähige Vorerfahrungen vermutet werden können, oder in der Literatur dokumentiert sind. Das betrifft auch solche Konzepte, die sich direkt aus Beobachtungen und eigenem Handeln ableiten lassen (*phänomenbasierte Konzepte*) gegenüber solchen, die hinter den Beobachtungen bzw. Erfahrungen liegenden Konstrukte beschreiben (*modellbasierte Konzepte*, vgl. von Aufschnaiter und Rogge 2010a, 2010b).

Uns ist wichtig zu betonen, dass unsere konstruktionsleitenden Annahmen zur inhaltlichen Sequenzierung zwar bereits relativ differenziert, vor dem Hintergrund real anzunehmender Lernprozesse aber immer noch eher schlicht sind. Es fehlt z. B. die Vorbereitung einer Binnendifferenzierung im Sinne der Adressierung bestimmter Teilkompetenzen/Konzepte für Lernende mit spezifischen Charakteristiken. Wir haben zudem bei der Auswahl und Anordnung von Teilkompetenzen und Konzepten keine anzunehmenden motivational-volitionalen und sozialen Faktoren berücksichtigt (z. B. fachliche Interessen, Selbstkonzept, Fähigkeit und Bereitschaft zum selbstbestimmten Arbeiten). Punktuell haben wir dieses Fehlen zwar in der Instruktion abgefangen (Einbau von Hilfen, Zusatzaufgaben für schnelle Lernende), dies kann jedoch grundsätzliche und die Instruktion systematisch vorbereitende Überlegungen nur in Ansätzen kompensieren.

3.2 Progression erster Art: Unterstützung von Erarbeitungsprozessen

Mit Blick auf die Progression erster Art ist der Frage nachzugehen, wie eine bestimmte Fähigkeit oder ein bestimmtes Konzept erstmalig aufgebaut und anschließend stabilisiert werden kann. Wir konnten kein Modell finden, das experiment-bezogenen Konzeptaufbau beschreibt, da die Modelle typischerweise auf Fähigkeiten gerichtet sind. Dort wiederum liegen kaum empirisch gesicherte Annahmen zur Progressionen erster Art vor. Für den *Konzeptaufbau* haben wir uns deshalb an

Annahmen und Befunden zum *fachinhaltlichen* Lernen orientiert, und darin vor allem Befunde und Annahmen zur strukturellen Progression (x-Achse in Abb. 1) im konzeptuellen Verständnis als transferierbaren Bezugsrahmen genutzt. Ausgehend von diesen Befunden wurde Konzeptaufbau entlang der Exploration konkreter Fälle (Beispiele, Erlebnisse, Erfahrungen; Stufe I) hin zu intuitiv (Stufe II) und explizit erfassten Konzeptualisierungen im Sinne von Verallgemeinerungen (Stufe III) strukturiert (vgl. von Aufschnaiter und Rogge 2010a, 2010b, 2012). Zentral ist somit, dass wir von den Lernenden immer erst relativ spät im Lernprozess verlangt haben, Konzepte selbst auszuformulieren (Stufe III). Es wurde deshalb auch darauf verzichtet, den Lernenden Konzepte vor der ersten Auseinandersetzung mit Aufgaben mitzuteilen, da nach bisherigen Befunden zum fachinhaltlichen Lernen davon auszugehen ist, dass diese Konzepte ohne erste Vorerfahrungen häufig nicht in der intendierten Weise verstanden werden (vgl. Modellierung in Neumann et al. 2007, die „übergeordneten Konzepte“ explizit als höchste Entwicklungsstufe annehmen). Mit Blick auf Stabilisierung wurde angenommen, dass die Progression nicht linear, sondern iterativ erfolgt, d. h. Lernende auch nach der eigenständigen Explizierung eines Konzepts (Stufe III) dieses erneut durch Explorationen erfassen müssen (Stufe I; von Aufschnaiter und Rogge 2010b). Nach dem erstmaligen Konzeptaufbau wurden deshalb im weiteren Verlauf der Instruktion Aufgaben gestellt, die zur wiederholten Exploration und/oder Anwendung eines Konzepts anregen. Erarbeitung und Wiederholungen sind hierbei durch zeitliche Lücken getrennt, in allen Phasen werden jedoch die *gleichen* Fähigkeiten und Wissensbestände thematisiert.

Für jede angestrebte *Fähigkeit* wurde geprüft, ob sie im Sinne einer Progression erster Art graduierbar ist und entsprechende Graduierungen beschrieben werden (z. B. im Sinne einer Graduierung kognitiver Anforderungen; Wellnitz et al. 2012). Die Fähigkeit, vorliegende Fragen, Hypothesen o. ä. im Hinblick auf ein Merkmal zu unterscheiden (z. B. präzise vs. allgemeine Fragen, Vermutungen vs. Hypothesen), ist z. B. weniger anspruchsvoll, als sachangemessene Fragen selbst zu formulieren oder die getroffene Unterscheidung zu begründen. Sowohl für das Unterscheiden als auch für das Formulieren ist es ausreichend, dass die Lernenden zugrundeliegende Konzepte intuitiv erfasst haben, für die Begründung einer Unterscheidung wird hingegen ein explizites Verständnis dieser Konzepte benötigt (vgl. von Aufschnaiter und Rogge 2010b). Entsprechend diesen Überlegungen haben wir die adressierten Fähigkeiten (vgl. Tab. 1 für FH) fortschreitend eingefordert.

Wie auch für die Sequenzierung entlang der Progression zweiter Art ist uns wichtig, die Beschränkung unserer Überlegungen zu betonen. Sie sind noch so wenig empirisch fundiert, dass unklar ist, unter welchen Randbedingungen das Abweichen von der beschriebenen Progression das Lernen der Konzepte möglicherweise stärker befördert. Konzepte, die auf Benennungen orientiert sind („Die Variable, die verändert wird, heißt unabhängige Variable“), lassen sich z. B. nicht sinnvoll durch Explorationen „finden“. Auch andere Konzepte werden u. U. schneller erfasst, wenn sie Explorationen vorangestellt bzw. „nur“ mit einem Beispiel verbunden werden (vgl. Wittwer und Renkl 2010). Zudem ist für uns empirisch und theoretisch noch vergleichsweise unklar, wie Konzept- und Fähigkeitsaufbau im Kompetenzaufbau miteinander verzahnt werden; dies ist eine inhaltliche Kernfragestellung des Forschungsprojektes, an der wir gegenwärtig arbeiten. In die instruktionale Ausgestal-

tung müssen ferner weitere Überlegungen einfließen, die sich nicht im Sinne einer (fachbezogenen) Progression beschreiben lassen, dennoch aber die Effektivität der Instruktion beeinflussen werden. Dazu gehört, neben der oben bereits angeführten Binnendifferenzierung, z. B. die Auswahl der fachinhaltlichen Beispiele (die sich auch an motivational-volitionalen Faktoren orientieren könnte bzw. sollte), Umfang und Art der Ausgestaltung textlicher und mündlicher Anweisungen sowie der eingeforderten Sicherungen.

3.3 Umsetzung der Instruktion

Ausgehend von den oben skizzierten Überlegungen wurden im Projekt zwei Varianten einer aus theoretischer Perspektive kohärenten Instruktion entwickelt (explizite und implizite Variante; s. unten). Für die Untersuchung von Fragen der Kohärenz beziehen wir uns im Folgenden nur auf den expliziten Ansatz, der sich, hypothesenkonform, als der wirksamere Ansatz erwiesen hat (vgl. Vorholzer 2016). Der Vergleich der beiden Varianten spielt für die hier vorgestellte Untersuchung nur eine untergeordnete Rolle (hierfür hätte auch eine Variante gereicht). Es werden dennoch kurz Gemeinsamkeiten und Unterschiede beider Varianten vorgestellt, um dem Kontext der analysierten Daten offenzulegen sowie die Einordnung unserer Ergebnisse und der darauf bezogenen Diskussion zu erleichtern.

Beide Varianten der Instruktion folgen den oben beschriebenen Progressionsüberlegungen und nutzen darin Prozesse des angeleiteten Experimentierens als Grundlage für Explorationen zum Aufbau und zur Stabilisierung intuitiv und explizit regelbasierter fachmethodischer Konzepte (Progression erster Art). In *expliziten Variante* der Instruktion werden nach ersten Explorationsphasen die angestrebten experimentbezogenen Konzepte den Lernenden mitgeteilt, an Beispielen erläutert (auf Informationskarten; z. B. Abb. 2 unten links und Abb. 8) sowie deren Anwendung in vielfältigen Aufgaben geübt (siehe Merkmale expliziter Instruktion, z. B. in Alfieri et al. 2011; Kalthoff et al. 2018; Vorholzer und von Aufschnaiter, 2019). In der *impliziten Variante* werden den Lernenden die Konzepte nicht mitgeteilt, sie werden jedoch durch die beiden Varianten zugrundeliegende inhaltliche Strukturierung systematisch dabei unterstützt, die Konzepte selbst zu „finden“ (vgl. discovery-based learning; z. B. Alfieri et al. 2011). Es werden z. B. alle naturwissenschaftlichen Fragen, zu denen weiterführende Überlegungen oder Untersuchungen angestellt werden sollen, unter Nennung der abhängigen und unabhängigen Variablen präzise formuliert (im Sinne von Tab. 1; vgl. die Beispiele in Abb. 2). Beide Varianten fordern gleichermaßen zur intensiven und selbstbestimmten Auseinandersetzung mit Aufgaben auf, fokussieren auf die gleichen experimentbezogenen Teilkompetenzen und nutzen die gleichen fachinhaltlichen Kontexte und Experimente. Die kleineren Zeitunterschiede durch das Fehlen der von Informationen zu fachmethodischen Konzepten werden durch erweiterte, aber für den anvisierten Kompetenzaufbau irrelevante, fachinhaltliche Arbeitsaufträge kompensiert. Beide Varianten bestehen aus drei Teilen: FH (45 min, Kontext: Schwerdruck in Flüssigkeiten), UP (90 min, Kontext: Freier Fall und Luftreibung) sowie AI (90 min, Kontext: Senkrechter, waagerechter und schiefer Wurf).

Explizit

Natalja führt einen Versuch nach folgender Anleitung durch:

1. Füllen Sie zwei gleiche Gläser mit unterschiedlich viel Wasser.
2. Tauchen Sie zwei gleiche Trinkhalme gleich tief in beide Gläser ein.
3. Pusten Sie erst schwach und dann immer stärker gleichzeitig in beide Trinkhalme.

Versuchen Sie, eine Fragestellung zu formulieren, der Natalja mit diesem Versuch nachgehen könnte.

[Textfeld für Antwort]

Implizit

Mit einem Versuch kann einer Vielzahl von Fragestellungen nachgegangen werden, hier z. B.:

- a) Was passiert, wenn mit zwei Trinkhalmen gleichzeitig und immer stärker in zwei unterschiedlich hoch gefüllte Gläser hineingeblasen wird?
- b) In welchem Glas steigen zuerst Blasen auf, wenn mit zwei Trinkhalmen gleichzeitig und immer stärker in zwei unterschiedlich hoch gefüllte Gläser hineingeblasen wird?

In der Tabelle sehen Sie Merkmale, die man bei Nataljas Versuch beobachten könnte.

Welche Merkmale müsste Natalja beobachten, wenn sie einen Versuch zu Frage a) durchführt, welche bei einem Versuch zu Frage b)? Kreuzen Sie an!

a)	b)	Merkmal
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wie groß die aufsteigenden Luftblasen sind.
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wann Luftblasen im Glas aufsteigen.
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wie sich das Gesicht des/der Pustenden während des Versuchs verändert.
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	...

[Lösungskarte mit angekreuzter Tabelle]

Eine naturwissenschaftliche Frage, die festlegt, was untersucht werden soll, könnte z. B. lauten:

In welchem Glas steigen zuerst Blasen auf, wenn in zwei unterschiedlich hoch gefüllte Gläser mit zwei Trinkhalmen gleichzeitig und immer stärker hineingepustet wird?

Führen Sie den Versuch durch und notieren Sie eine Antwort auf diese Frage.

[Textfeld für Antwort]

Frage a) „Was passiert, wenn ...“ beschreibt *allgemein*, was mit dem Versuch untersucht werden soll. Die Frage ist *wenig präzise* und daher können viele verschiedene Merkmale beobachtet werden, z. B.:

- Gesicht des Experimentators
- Farbe des Wassers
- Größe der Luftblase
- ...

Frage b) „In welchem Glas steigen zuerst Blasen auf, wenn...“ beschreibt *präzise*, was mit dem Versuch untersucht werden soll; *das zu beobachtende Merkmal wird deutlich*.

[Anwendungsaufgabe zur Unterscheidung präzise/allgemein und Lösungskarte]

Mit dem Versuch, den Sie eben durchgeführt haben, können Sie nicht nur herausfinden, wo zuerst Luftblasen aufsteigen, sondern erhalten auch ein relatives Maß für den Druck im Wasser am Ende der beiden Trinkhalme.

Wenn Sie in beide Trinkhalme gleichzeitig pusten, gilt: **Am Ende des Trinkhalms, an dem zuerst Luftblasen aufsteigen, ist der Druck im Wasser kleiner als am Ende des anderen Trinkhalms.**

Beispiel: Den rechts abgebildeten Versuch haben Sie bereits durchgeführt und beobachtet, dass im linken Glas zuerst Luftblasen aufsteigen. Damit gilt auch:

Der Druck im Wasser ist am Ende des linken Trinkhalms kleiner als der Druck im Wasser am Ende des rechten Trinkhalms.

[Drei Aufgabenkarten zur Nutzung der Luftblasen als Indikator für den Druck]

Diskutieren Sie kurz:

- 1) Wieso ist es nicht immer möglich, eine Fragestellung präzise zu formulieren?
- 2) Welche Vorteile hat es, eine Fragestellung so präzise wie möglich zu formulieren?

Überlegen Sie sich einen Versuch, mit dem unterschiedliche Trinkalm-Durchmesser untersucht werden können.

Formulieren Sie zunächst eine geeignete naturwissenschaftliche Fragestellung.

[Textfeld für Antwort]

Wenn Sie bereits eine begründete Vermutung darüber haben, was bei dem von Ihnen geplanten Versuch passieren wird, notieren Sie diese ebenfalls.

[Textfeld für Antwort]

Führen Sie den Versuch durch und beantworten Sie die von Ihnen formulierte Frage bzw. prüfen Sie die von Ihnen formulierte Vermutung.

Abb. 2 Gekürzter und leicht modifizierter Auszug aus der expliziten Instruktion (links zum Konzept „präzise Frage“) und entsprechende Aufgaben der impliziten Instruktion (rechts)

Beide Varianten der Instruktion sind so angelegt, dass sie in Kleingruppen von je 2–3 Schüler*innen selbstständig bearbeitet werden können. Dazu wurden sämtliche Arbeitsaufträge, Hinweise, Kontrollen, Erläuterungen usw. schriftlich auf *Aufgabenkarten* umgesetzt (vgl. Abb. 2), die typischerweise eine Aufgabe oder mehrere inhaltlich eng zusammenhängende Teilaufgaben beinhalten. Das gewählte Vorgehen mi-

nimiert Einflüsse der Lehrkraft und unterstützt damit auch die Vergleichbarkeit der Prozesse in verschiedenen Varianten.

4 Datenerhebung und -auswertung

Um individuellen Kompetenzaufbau nachvollziehen zu können, nutzen wir sowohl Prä-Post-Erhebungen als auch Videoaufzeichnungen. Letztere geben Aufschluss darüber, wie bzw. unter welchen Bedingungen, Wissensbestände und Handlungen miteinander verbunden werden und sich im Laufe von Lernprozessen weiterentwickeln. In diesen Prozessen zeigt sich auch, wie die Instruktion genutzt wird, woraus sich wiederum Hinweise auf vorhandene oder fehlende Kohärenz ergeben. Der Beitrag fokussiert im Schwerpunkt auf die Videoaufzeichnungen und deren Auswertung, um Potentiale und Herausforderungen prozessbasierter Analysen des Kompetenzaufbaus aufzuzeigen und Fragen der Passung zu (angenommenen) Progressionen zu diskutieren. Im Folgenden werden jedoch zunächst Ergebnisse eines schriftlichen Prä-Post-Vergleichs präsentiert, da diese zum einen Hinweise auf die grundsätzliche Eignung der Instruktion liefern und z.T. zur Vorauswahl der Videodaten genutzt wurden.

4.1 Datenerhebung

Die Studie ist in einem quasi-experimentellen Design angelegt, in dem ein schriftlicher Prä- und Posttest sowie Videoaufzeichnungen für die Erhebung von Daten genutzt wurden (vgl. Abb. 3). Die Instruktion war Bestandteil des regulären Physikunterrichts aller zwölf Klassen der Einführungsphase eines Gymnasiums ($N_{\text{Gesamt}} = 222$ Schüler*innen, Alter ca. 16–17 Jahre, 65 % weiblich); je sechs Klassen bildeten die Testgruppe (explizite Instruktion, $N = 111$, 63 % weiblich) und die Kontrollgruppe (implizite Instruktion).

Im zweiteiligen Prätest wurden die allgemeinen kognitiven Fähigkeiten, die fachinhaltlichen Vorkenntnisse, das fachbezogene Interesse und die fachbezogene Selbsteinschätzung der Lernenden erfasst, u. a. um die Vergleichbarkeit von Test- und Kon-

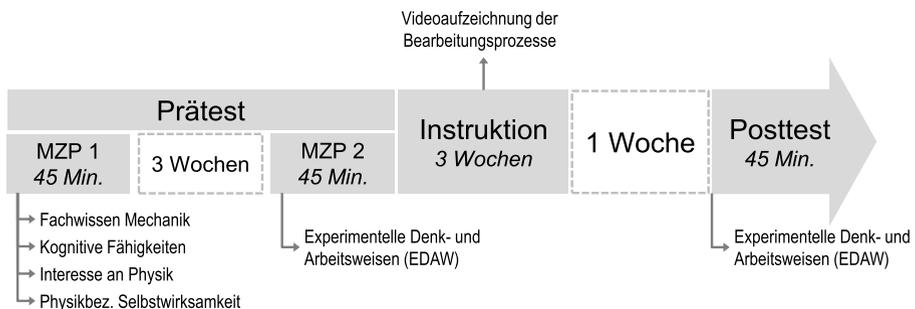


Abb. 3 Überblick über zeitlichen Ablauf der Datenerhebung. Die Prätestung wurde auf zwei Messzeitpunkte (MZP) verteilt, um eine Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit bzw. -bereitschaft der Schüler*innen durch lange Testungen zu vermeiden

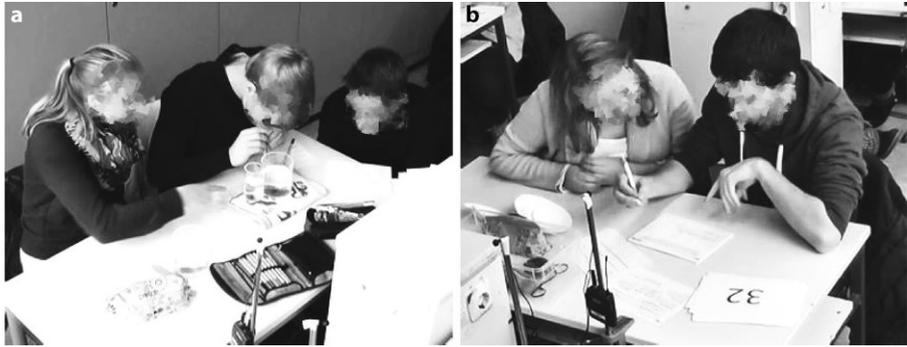


Abb. 4 Typische Kameraperspektive, in der die Schüler*innen bei der Bearbeitung der Instruktion gefilmt wurden. **a** Beim Experimentieren, **b** bei der Beantwortung von Fragen

trollgruppe zu gewährleisten (ausführlich in Vorholzer 2016; Vorholzer et al. 2018). Die experimentbezogene Kompetenz der Schüler*innen wurden sowohl im Prä- als auch im Posttest mit dem *Experimentelle Denk- und Arbeitsweisen Test* (EDAWT; Vorholzer et al. 2016) erhoben. Mit Hilfe des Prä-Post-Vergleichs wurde untersucht, ob die aus unsere Sicht kohärent angelegte Instruktion zu einer messbaren Veränderung der Kompetenz geführt hat.⁴ Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Kompetenzzuwachs in der Test- und der Kontrollgruppe, der in beiden Gruppe einem großen Effekt entspricht (Testgruppe: $t = 7,506$, $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,46$; Kontrollgruppe: $t = 4,806$, $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,26$). Die Kovarianzanalyse zeigt zudem, dass der Kompetenzzuwachs in der Testgruppe signifikant größer ist als in der Kontrollgruppe ($F(1, 127) = 9,77$, $p = 0,002$), dieser Unterschied entspricht einem mittleren Effekt ($\eta_p^2 = 0,07$). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die in Abschn. 3.1 beschriebenen Überlegungen zur Sequenzierung grundsätzlich zielführend sind und der Kompetenzzuwachs nicht allein auf die erneute Testung o. Ä. zurückgeführt werden kann (vgl. Vorholzer et al. 2018).

Zusätzlich zu den Testungen wurden pro Klasse ca. 4–5 Gruppen mit jeweils 2–3 Schüler*innen während der Bearbeitung der Instruktionen auf Video aufgezeichnet ($N_{\text{Video}} = 121$, 62,0 % weiblich, $N_{\text{Testgruppe}} = 74$, 65,7 % weiblich). Die Aufzeichnung erfolgte mit einer festen Kamera und einem festen Mikrophon pro Schülergruppe (siehe Abb. 4). Die Zusammensetzung der Gruppen wurden nicht vorgegeben, um Kommunikationsprozesse in den Gruppen nicht durch eine erzwungene Zusammenarbeit zu behindern. Da sich nur ca. die Hälfte aller Schüler*innen einer Klasse mit einer Videoaufzeichnung einverstanden erklärt hat, war dies das einzige Auswahlkriterium, das angewendet wurde. Die etwas ungleiche Verteilung der aufgezeichneten Schüler*innen auf Test- und Kontrollgruppe ist dadurch bedingt, dass wir Gruppen

⁴ Grundsätzlich ist es denkbar, die Auswertung des EDAWT auf die Items zur Subskala FH zu beschränken, da diese den Fokus der im Beitrag vorgestellten Analysen darstellt. Rasch-gestützte Dimensionsanalysen zeigen jedoch, dass die drei Teilkompetenzen empirisch nicht trennbar sind. Zudem ist die Reliabilität der Subskala FH deutlich geringer als die der Gesamtskala (vmtl. aufgrund der geringeren Itemanzahl). Auf eine Auswertung auf Ebene der Teilkompetenzen wurde deshalb verzichtet (s. ausführliche Diskussion in Vorholzer et al. 2016).

nur dann aufgezeichnet haben, wenn alle Gruppenmitglieder einverstanden waren, was in der Kontrollgruppe etwas seltener der Fall war als in der Testgruppe. Zudem gab es bei den Aufzeichnungen in der Kontrollgruppe vereinzelt technische Schwierigkeiten, die zu Ausfällen bei der Aufzeichnung geführt haben.

4.2 Auswertung der Videodaten

Zur Illustration möglicher Ansätze der videogestützten Analyse des Kompetenzaufbaus von Lernenden fokussieren wir auf die explizite Instruktion, da diese zu besseren Lernergebnissen geführt hat und demzufolge eine höhere instruktionale Kohärenz aufweisen sollte. Aus den insgesamt 90h Video der Testgruppe wurden für die Analyse zunächst die Videos der Gruppen ausgewählt, die sich im Hinblick auf den im Prä-Post-Vergleich gemessenen Kompetenzzuwachs besonders stark unterscheiden (Maximalkontrast). In einem ersten Zugang werden die verbalen und nonverbalen *Aktivitäten* der Schüler*innen bei der Bearbeitung der Instruktion *kategoriengestützt* analysiert. Ziel dieser Analyse ist es, zu erfassen, in welchem Umfang und wann z. B. über fachinhaltliche, fachmethodische oder organisatorische Aspekte gesprochen wird, unabhängig davon, um welchen fachmethodischen Inhalt es sich handelt. Hinweise auf Kompetenzfortschritt ergeben sich vor allem dadurch, dass fachmethodische Beiträge vermehrt in den Zusammenhängen auftauchen, in denen sie handlungsleitend sein sollten (z. B. im Planungsprozess eines Experimentes). Gleichzeitig kann zu Fragen der Kohärenz untersucht werden, ob Aufgaben, die fachmethodische Beiträge „provokieren“ sollen, auch zu solchen Beiträgen führen. Es handelt sich aber immer um einen relativ groben Zugriff auf den Kompetenzaufbau, da u. a. nicht geprüft wird, worauf die Äußerungen bezogen und ob sie sachangemessen sind. Die Einordnung der Ergebnisse in eine Progression erster oder zweiter Art ist daher kaum möglich. In einem zweiten Zugang werden deshalb ergänzend die Inhalte der Äußerungen analysiert, um die *inhaltlichen Verständnisse* zu einem bestimmten Konzept, z. B. den Merkmalen einer naturwissenschaftlichen Frage, sowie deren Entwicklung zu erfassen (Progression erster Art).

4.2.1 Kategoriengestützte Analyse von Aktivitäten

Bei der Entwicklung der Kategorien zur Erfassung von Aktivitäten haben wir uns an Vorarbeiten orientiert, in denen u. a. die Aktivitäten von Lernenden beim Bearbeiten fachinhaltlicher Aufgaben erfasst wurden (u. a. Rogge 2010). Ein erster Entwurf des Systems wurde anschließend in mehreren Iterationsschritten erprobt, ausgeschärft und um induktiv abgeleitete Kategorien ergänzt (siehe Tab. 2). Zentral ist die Unterscheidung zwischen *fachmethodischen Beiträgen* (z. B. „Du darfst nicht mehr als eine Variable zurzeit verändern“, „Hier ist die Fallhöhe die unabhängige Variable“), *fachinhaltlichen Beiträgen* (z. B. „Je schwerer ein Gegenstand, desto schneller fällt er zu Boden“) und *Beiträgen zur manuellen Durchführung* eines Experimentes (z. B. „Halte das Lineal hier fest“, „Auf drei lassen wir los“).

Die Aktivitäten werden für jede*n einzelne*n Schüler*in eventbasiert kodiert. Jede Äußerung stellt ein Event dar; aufeinanderfolgende Äußerungen werden nur getrennt, wenn ihnen verschiedene Codes zugewiesen werden oder sie mehr als

Tab. 2 Übersicht über ausgewählte Kategorien des Kategoriensystems (ein vollständiger Kodierleitfaden kann bei der Autorengruppe angefordert werden)

Kategorie	Kurzbeschreibung
<i>Aufgabenkarte</i>	Aktuell bearbeitete Aufgabenkarte [gruppenweise kodiert]
<i>Nonverbale Aktivitäten</i>	
Schreiben	Antwort, Rechnung, Zeichnung, ... wird auf eine Aufgabenkarte oder einen Schmierzettel geschrieben
Experimentieren	Aufbau oder Durchführung eines (selbst ausgedachten oder in der Instruktion angelegten) Versuchs (ohne Materialbeschaffung)
<i>Verbale Aktivitäten (Äußerungen)</i>	
Vorlesen	Text von einer Aufgabenkarte wird laut vorgelesen
Fachinhaltlicher Beitrag	Äußerung oder Frage zu fachinhaltlichen Themen, Konzepten, Erkenntnissen, Beispielen, ... sowie Beobachtungen, Deutungen zu einem (Gedanken-)Experiment
Fachmethodischer Beitrag	Äußerung oder Frage dazu, worauf es aus fachmethodischer Sicht beim experimentbezogenen Denken und Arbeiten ankommt
Beitrag zur manuellen Durchführung	Handlungsanweisung oder Frage zum Aufbau oder zur Durchführung eines Versuchs

Weitere Kategorien umfassen u. a. Beiträge zur Arbeitsorganisation, Erlebensäußerungen sowie eine Zuordnung der fachmethodischen Beiträge zu den Teilkompetenzen FH, UP, AI

3 s auseinanderliegen. Etwa 10 % des Videomaterials wurden doppelkodiert, um die Interdecoderübereinstimmung der beiden eingesetzten Kodierer zu untersuchen. Die Übereinstimmung ist mit $\kappa = 0,63$ für verbale Aktivitäten und $\kappa = 0,75$ für nonverbale Aktivitäten als zufriedenstellend einzuschätzen.

4.2.2 *Qualitative Analyse von inhaltlichen Verständnissen*

Ausgehend von der Analyse der Aktivitäten werden zusammenhängende Sequenzen ausgewählt, die zum einen viele fachmethodische Beiträge der Schüler*innen beinhalten und zum anderen im Material als *Erarbeitung* (Progression erster Art) zu einem spezifischen experimentbezogenen Konzept konzipiert sind. Die ausgewählten Sequenzen dauern etwa 5 bis 10 min und umfassen Explorationen zum angestrebten Konzept, (mindestens) eine Mitteilung des angestrebten Konzeptes (Information) und Anregung zur Anwendung des Konzeptes. Daran anschließend werden Aufgaben innerhalb der gleichen und der folgenden Einheiten identifiziert, die das gleiche Konzept erfordern, um zu untersuchen, ob sich spezifische Verständnisse bzw. Nutzungsweisen (im Sinne von Fähigkeiten) stabilisieren und damit auf eine Veränderung von Kompetenz hindeuten.

Zur Erfassung der Verständnisse der Schüler*innen wird ein Verfahren eingesetzt, das an die *qualitative Inhaltsanalyse* nach Mayring (z. B. Mayring 2015) angelehnt ist. Dazu werden zunächst alle Schüleräußerungen und zentrale nonverbale Aktivitäten (z. B. experimentelle Handlungen, Umblättern der Aufgabenkarten) des Bearbeitungsprozesses transkribiert. Im *ersten analytischen Schritt* werden die Inhalte der Äußerungen zum ausgewählten experimentbezogenen Konzept auf der Ebene von einzelnen (Halb-)Sätzen rekonstruiert. Für das Konzept zu Kennzeichen von natur-

Tab. 3 Beispiele für die generierten inhaltlichen Kategorien zu Kennzeichen naturwissenschaftlicher Fragen

Schüleräußerung	Zugewiesene <i>inhaltliche</i> Kategorie
Zu jeder naturwissenschaftlichen Frage kann man einen Versuch durchführen	Naturwissenschaftliche Fragen sind Fragen, zu denen man einen Versuch durchführen kann
Das ist eine [naturwissenschaftliche Frage]; du kannst es ja irgendwie beweisen	Naturwissenschaftliche Fragen sind Fragen, deren Antwort man beweisen kann
Das ist doch subjektiv, darum ist es keine [naturwissenschaftliche Frage]. Die Antwort ist für jede Person anders, also ist es keine naturwissenschaftliche Frage Das hängt ja davon ab, um wen es hier geht	Naturwissenschaftliche Fragen sind keine Fragen, auf die man subjektiv antworten kann

wissenschaftlichen Fragen wurden beispielsweise Äußerungen gesucht, die sich als Antworten auf die Frage „Was kennzeichnet eine naturwissenschaftliche Frage?“ deuten lassen. Im Rahmen dieses ersten Schrittes wird auch die Richtigkeit aller Aussagen kodiert, die Entscheidungen dazu enthalten, ob eine Beispielfrage naturwissenschaftlich ist oder nicht. Außerdem wird kategorial erfasst, zu welcher Aufgabe sich die Schüler*innen äußern. In der Regel ist dies die Aufgabe, die vor ihnen lag und im Video gut zu erkennen ist (vgl. Abb. 4). Im *zweiten analytischen Schritt* werden (induktiv) inhaltliche Kategorien generiert, die die rekonstruierten Verständnisse in inhaltlich ähnliche Überlegungen bündeln. Wir haben bei der Bildung der Kategorien zunächst versucht, möglichst nah an den Äußerungen der Schüler*innen zu bleiben, um die vorliegende Varianz differenziert erfassen zu können. Tab. 3 gibt Beispiele für die generierten *inhaltlichen Kategorien* zu Kennzeichen naturwissenschaftlicher Fragen. Im Zuge der Auswertung wurden diese Kategorien später in einem weiteren Schritt zu übergeordneten Hauptkategorien aggregiert (vgl. Tab. 5).

Aufgrund des für die Transkription erforderlichen zeitlichen Aufwandes erfolgt die längsschnittliche Analyse von Bearbeitungsprozessen, die im Sinne einer Wiederholung zeitlich nach der Erarbeitung liegen (vgl. Progression erster Art, Abb. 1), direkt am Video. Aufgrund der jeweils intensiven vorlaufenden Auseinandersetzung mit den Daten im Kontext der Erarbeitung ist davon auszugehen, dass der Verzicht auf Transkription durch die Erfahrung mit den Schüleräußerungen zumindest in weiten Teilen kompensiert wird. Die generierten inhaltlichen Kategorien wurden zudem genutzt, um alle Informationen auf den Karten zu kodieren, sodass die Passung zwischen diesen Informationen und den Verständnissen der Schüler*innen untersucht werden kann.

5 Exemplarische Ergebnisse und Diskussion der videogestützten Analysen zum Kompetenzaufbau

Die Grundlage für die Analyse der *Aktivitäten* stellen, abhängig vom Instruktionsteil (FH, UP, AI), sieben bis zehn Gruppen der Testgruppe dar. Die Analyse der

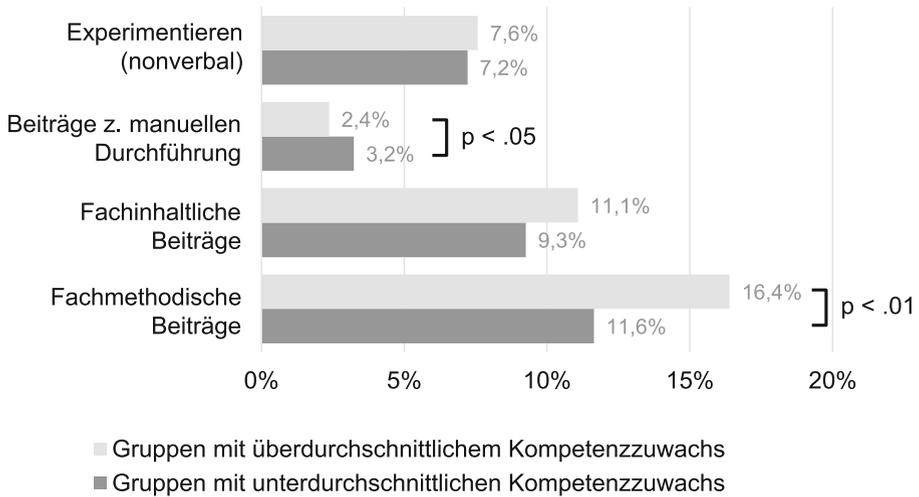


Abb. 5 Mittlere prozentualer Anteil ausgewählter verbaler und nonverbaler Aktivitäten bezogen auf die gesamte Bearbeitungsdauer des Instruktionsteils FH

Verständnisse ist für eine Sequenz aus dem Bereich FH für sieben Gruppen der Testgruppe abgeschlossen. Obwohl die bisher durchgeführten Analysen nur einen Teil des Datensatzes und der Einheiten umfassen, haben sie relevante Ergebnisse hervorgebracht, aus denen deutlich wird, welche Art von Ergebnissen zum Kompetenzaufbau entsprechende Analysen hervorbringen können, welche Merkmale kohärente Instruktion auszeichnen und welche Herausforderungen sich (für die Interpretation der Ergebnisse) ergeben.

5.1 Kategoriengestützten Analyse von Aktivitäten

Für die analysierten Gruppen wurden die relativen zeitlichen Anteile der einzelnen verbalen und nonverbalen Aktivitäten an der gesamten Bearbeitungszeit berechnet und anschließend die Gruppen mit überdurchschnittlichem und die Gruppen mit unterdurchschnittlichem Kompetenzzuwachs miteinander verglichen. Abb. 5 zeigt exemplarisch einen solchen Vergleich zwischen 4 Gruppen mit über- und 6 Gruppen mit unterdurchschnittlichem Kompetenzzuwachs für den Instruktionsteil FH.

Die Ergebnisse für den Instruktionsteil FH zeigen u. a., dass der relative zeitliche Anteil fachmethodischer Beiträge bei Gruppen mit höherem Kompetenzzuwachs signifikant größer ist als bei Gruppen mit niedrigerem Kompetenzzuwachs ($t = -3,656$; große Effektstärke $r = 0,57$). Für Beiträge zur manuellen Durchführung verhält es sich umgekehrt ($t = 2,210$; mittlere Effektstärke $r = 0,40$). Werden nicht Gruppen, sondern einzelne Schüler*innen mit einem überdurchschnittlichen und einem unterdurchschnittlichen Kompetenzzuwachs verglichen, ergibt sich ein ähnliches Bild, allerdings sind die Unterschiede bzgl. der Aktivitäten nicht mehr signifikant. Diese ersten Befunde lassen vermuten, dass es einen positiven Zusammenhang zwischen der Häufigkeit expliziter Konzeptualisierungen im Lernprozess und dem Kompetenzzuwachs gibt. Instruktionen sind in diesem Sinne dann kohärent, wenn sie solche

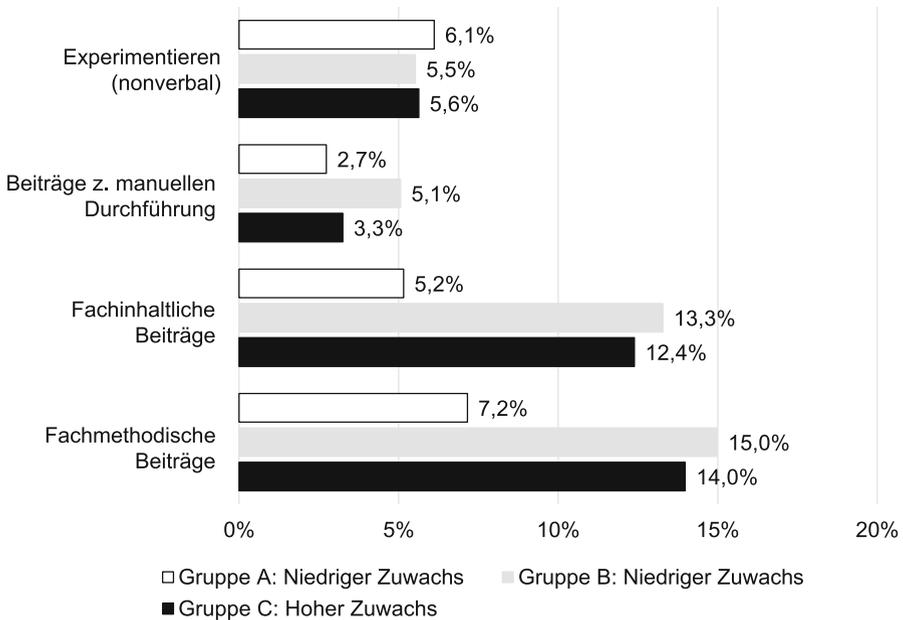


Abb. 6 Aktivitätsprofile (prozentualer Anteile ausgewählter verbal und nonverbaler Aktivitäten bezogen auf die gesamte Bearbeitungsdauer des Instruktionsteils FH) für Gruppen mit unterschiedlich hohem Kompetenzzuwachs

Explizierungen provozieren (nachdem die Konzepte aufgebaut wurden). Die Tatsache, dass wir bei gleicher Instruktion deutliche Unterschiede auf der Gruppenebene finden, deutet aber gleichzeitig darauf hin, dass das „Provozieren“ nicht in gleicher Weise für alle Lernenden funktioniert und damit auch kein generelles Maß für Kohärenz ist.

Werden Gruppen mit einem ähnlichen niedrigen Kompetenzzuwachs verglichen, weisen sie z. T. sehr unterschiedliche Aktivitätsprofile auf (Abb. 6, Vergleich von Gruppe A und Gruppe B). Gleichzeitig können Gruppen mit deutlich unterschiedlichem Kompetenzzuwachs nahezu identische Aktivitätsprofile zeigen (Abb. 6, Vergleich von Gruppe B und Gruppe C). Unter der Annahme, dass ein ganz bestimmtes Lernangebot nicht gleichzeitig für alle unterschiedlichen Lernenden kohärent sein kann, ist nicht verwunderlich, dass sich die Aktivitätsprofile von Gruppen mit hohem Kompetenzzuwachs und solchen mit niedrigem unterscheiden (A vs. C). Bemerkenswerter sind die Ähnlichkeiten zwischen Gruppen mit unterschiedlichem Zuwachs (B vs. C) bzw. die Unterschiede zwischen Gruppen mit gleichem Zuwachs (A vs. C). Diese Unterschiede verweisen darauf, dass mögliche Antworten auf die Frage nach Merkmalen kohärenter Instruktion komplex ausfallen werden. Darin wird es vermutlich auch auf eine für uns gegenwärtig nicht hypothetisch ableitbare Mischung aus eigenen Explizierungen und Mitteilungen aus dem Umfeld der Lernenden (Informationen in der Instruktion, Äußerungen von Mitschüler*innen oder Lehrkräften) ankommen. Dies allerdings wird nicht der einzige Faktor sein, den es zu bedenken gilt, bereits zur Untersuchung dieses Faktors ist jedoch eine differen-

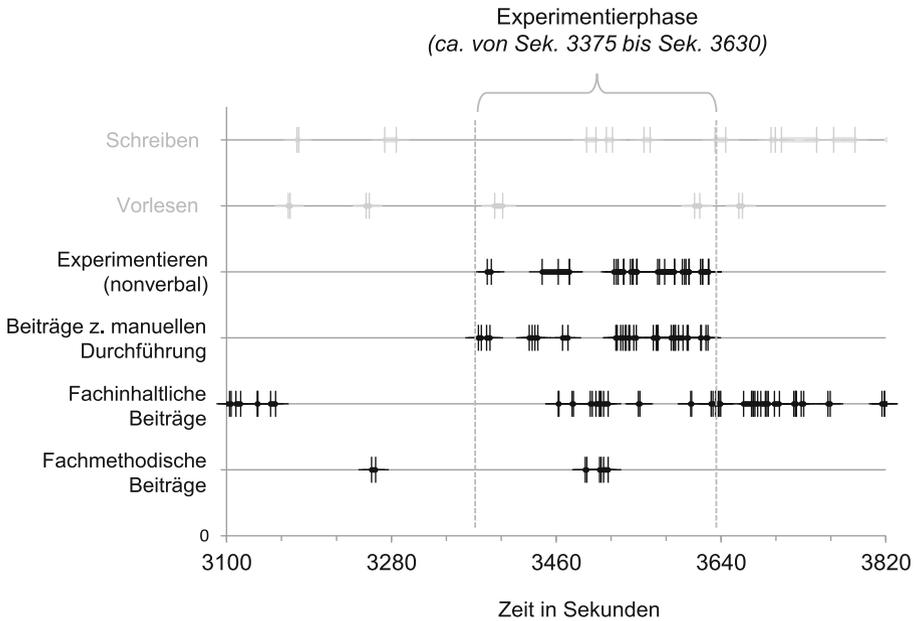


Abb. 7 Darstellung der Aktivitäten einer Gruppe im zeitlichen Verlauf vor, während, und nach einer Experimentierphase im zweiten Instruktionsteils (UP)

ziertere Betrachtung der Lernenden erforderlich, die über die Unterscheidung von Gruppen mit hohem und niedrigem Zuwachs hinausgeht.

Ergänzend zu Analysen, die auf der *Anzahl* bzw. *Dauer* einzelner Kodierungen basieren, haben wir Analysen zu den *zeitlichen Verläufen* der Aktivitäten durchgeführt. Zugrunde liegt die Annahme, dass sich im Sinne einer Progression zweiter Art Kompetenzaufbau (auch) darin zeigt, dass Lernende vermehrt fachmethodische Beiträge dort generieren, wo sie handlungsleitend sind bzw. sein sollten. Die Annahme ist mindestens insofern stark vereinfacht, weil sich Fortschritt auch darin zeigen kann, dass Lernende es „einfach richtig machen“, ohne zu verbalisieren. Zudem ergibt sich die Herausforderung, dass gelingender oder misslingender Kompetenzaufbau (Progression erster Art) zu einer vorlaufenden Teilkompetenz sicher Einfluss auf den weiteren Kompetenzaufbau hat, wenn z. B. die nächste Teilkompetenz auf gleiche oder ähnliche Konzepte zurückgreift, um dieses zu erweitern (Progression zweiter Art). Aufgrund dieser Beschränkungen haben wir zunächst nur untersucht, ob sich überhaupt Zusammenhänge zwischen fachmethodischen Beiträgen und experimentbezogenen Aktivitäten zeigen, ohne daraus Aussagen zum Kompetenzaufbau ableiten zu wollen. Entsprechende Analysen geben aber zumindest Hinweise auf Kohärenz: Wenn fachmethodische Beiträge dort auftauchen, wo sie aus Sicht der Instruktion besonders passend oder erforderlich sind, dann könnte dies ein Hinweis auf Kohärenz sein.

Für die Analysen des Zeitverlaufs haben wir uns auf den Instruktionsteil UP konzentriert, weil dort ein Zusammenhang zwischen der Äußerung fachmethodischer Konzepte und dem Experimentieren aus instruktionaler Sicht besonders nahelie-

Es kann nicht immer eindeutig entschieden werden, ob eine Fragestellung „naturwissenschaftlich“ ist oder nicht. **Ein zentrales Merkmal einer naturwissenschaftlichen Fragestellung ist jedoch, dass sie mit naturwissenschaftlichen Methoden untersucht werden kann.**

Naturwissenschaftliche Methoden sind Messungen/Beobachtungen/Zählungen von objektivierbaren Ereignissen. Nicht objektivierbare Ereignisse sind z. B. Geschmack, Meinung, Einstellung usw.

<p>Beispiel-Frage 1: <i>Hat der Luftdruck einen Einfluss darauf, bei welcher Temperatur Wasser kocht?</i></p> <p>Der Luftdruck kann mit einem Barometer <i>gemessen</i> werden. Die Temperatur von Wasser am Siedepunkt kann mit einem Thermometer <i>gemessen</i> werden. Das Ergebnis beider Messungen ist unabhängig davon, wer die Messungen durchführt und deshalb <i>objektiv</i>.</p> <p>✓ Es handelt sich um eine naturwissenschaftliche Fragestellung.</p>
<p>Beispiel-Frage 2: <i>Schmeckt Mineralwasser mit Kohlensäure besser als Leitungswasser?</i></p> <p>Ob etwas gut schmeckt oder nicht, ist <i>nicht objektiv messbar</i>, sondern hängt von dem Geschmack der befragten Personen ab.</p> <p>✗ Es handelt sich <i>nicht</i> um eine naturwissenschaftliche Fragestellung.</p>

Abb. 8 Informationskarte, auf der das Konzept zur Unterscheidung von naturwissenschaftlichen und nicht-naturwissenschaftlichen Fragen mitgeteilt und an einem Beispiel illustriert wird. Die Informationskarte befindet sich etwa in der Mitte der Erarbeitung

gend ist. Es zeigt sich jedoch, dass vor und während des Experimentierens nur selten fachmethodische Beiträge geäußert werden. So finden sich z. B. im Verlauf der Aktivitäten einer Gruppe mit überdurchschnittlich hohem Kompetenzzuwachs in den 5 min vor Beginn der Experimentierphase (gekennzeichnet durch gehäufte nonverbale Experimentieraktivität und verbale Beiträge zur manuellen Durchführung) nur vereinzelte und kurze (<10s) fachmethodische Beiträge (vgl. Abb. 7). Erst nach ca. der Hälfte der Experimentierphase werden fachmethodische Aspekte (etwas) ausführlicher diskutiert. Für uns stellt sich die Frage, ob die geringe Anzahl fachmethodischer Äußerungen *vor* einer experimentellen Handlung ein Hinweis auf geringe Kohärenz ist (d. h., bei geschickter angelegter Instruktion würden den Lernenden die Bezüge gelingen), oder ob es schlicht typisch für menschliches Handeln ist, dass das Nachdenken über die Handlung erst während oder nach der Handlung erfolgt (vgl. Diskussion der Dichotomie von Wissen und Handeln z. B. in der Lehrerbildung, Neuweg 2002). Um dieser Frage nachzugehen, muss jedoch nicht nur die zeitliche, sondern auch die inhaltliche Nähe zwischen den Äußerungen und den Handlungen der Lernenden untersucht werden: Haben z. B. die fachmethodischen Äußerungen in der Mitte der Experimentierphase in Abb. 7 tatsächlich etwas mit dem gerade durchgeführten Experiment zu tun?

Tab. 4 Überblick über die Kategorien für die Verständnisse zu Kennzeichen von naturwissenschaftlichen Fragen

Kategorie	Beschreibung
Klang (KL)	Der Klang der Frage (z. B. klingt gut, klingt unsinnig) ist ausschlaggebend dafür, ob die Frage naturwissenschaftlich ist oder nicht
Effekt (EF)	Der Einfluss einer Größe ist ausschlaggebend dafür, ob die Frage naturwissenschaftlich ist oder nicht
Antwort (AW)	Die (Art der) Antwort auf eine Frage (z. B. ob die Frage beantwortbar ist oder ob es sich um eine Ja-Nein-Frage handelt) bestimmt, ob die Frage naturwissenschaftlich ist oder nicht
Nawi Eigenschaften (NE)	Eine naturwissenschaftliche Frage enthält naturwissenschaftliche Größen oder Eigenschaften
Meinung (ME)	Eine naturwissenschaftliche Frage fragt nicht nach persönlichen Ansichten oder Meinungen
Fachbezug (FB)	Eine (nicht-)naturwissenschaftliche Frage enthält Bezüge zu einer (nicht-)naturwissenschaftlichen Fachdisziplin
Beleg/Beweis (BB)	Die Antwort auf eine naturwissenschaftliche Frage kann belegt, begründet oder bewiesen werden
Methode, Andere (MA)	Eine nicht-naturwissenschaftliche Frage kann mithilfe einer nicht-naturwissenschaftsbezogenen Methode (z. B. Umfrage) beantwortet werden
Methode, Nawi (MN)	Eine naturwissenschaftliche Frage kann mit einer naturwissenschaftsbezogenen Methode (z. B. Experiment, Messung, Zählen, Beobachtung) beantwortet werden
Subjektiv-Objektiv (SO)	Eine (nicht-)naturwissenschaftliche Frage behandelt Objektives (Subjektives)
Sonstiges (SX)	Alle anderen Ideen

5.2 Qualitativen Analyse der inhaltlichen Verständnisse

Die zu den Merkmalen von naturwissenschaftlichen Fragen analysierte Sequenz umfasst sechs Aufgabenkarten sowie eine Informationskarte in der Mitte der Sequenz, auf der das Konzept zur Unterscheidung von naturwissenschaftlichen und nicht-naturwissenschaftlichen Fragen mitgeteilt und mit Beispielen verbunden wird (Abb. 8, zeitlich im Instruktionsteil FH nach der in Abb. 2 gezeigten Sequenz angeordnet).

Die Verständnisse, die sich den Äußerungen der einzelnen Schüler*innen während der Bearbeitung der Sequenz zuweisen lassen, fallen inhaltlich sehr unterschiedlich aus; die zunächst gebildeten Kategorien (siehe Bsp. in Tab. 3) wurden zu insgesamt 11 Hauptkategorien zusammengefasst (Tab. 4). Für bestimmte Verständnisse zeigen sich schon vor der Informationskarte (Abb. 8) über die Gruppen hinweg Häufungen (*Effekt*, *Fachbezug*, *Meinung* und *Nawi Eigenschaften*, siehe die Zuweisungen auf individueller Ebene; Tab. 5), darüber hinaus weisen die Profile der Gruppen jedoch mehr Unterschiede als Gemeinsamkeiten auf. Innerhalb der einzelnen Gruppen ist die Varianz in den rekonstruierten Verständnissen etwas geringer. Besonders auffällig ist, dass sich für individuelle Schüler*innen bereits in dieser kurzen Sequenz eine Reihe unterschiedlicher Verständnisse rekonstruieren lassen (z. B. für S2, S18, S22 in Tab. 5).

Werden die Aufgabenkarten einzeln betrachtet (in Tab. 5 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt), ergibt sich zu gleichen Aufgabenkarten über die Grup-

Tab. 5 Überblick über zugewiesenen Kategorien für eine Sequenz aus sechs Aufgaben- und einer Informationskarte zu Kennzeichen naturwissenschaftlicher Fragestellungen

Gruppe/Person	Verständnisse bei den Aufgabenkarten 1 bis 3											Verständnisse bei den Aufgabenkarten 4 bis 6										
	KL	EF	AW	NE	ME	FB	BB	MA	MN	SO	SX	KL	EF	AW	NE	ME	FB	BB	MA	MN	SO	SX
A	S1	-	x	-	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-
	S2	x	x	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	0	-	-
	S3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-
C	S4	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	0	x
	S5	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	0	-
	S6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-	0	x
D	S7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-
	S8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-
	S9	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-
E	S10	-	-	-	-	-	x	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-
	S11	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	0	-	-	-
	S12	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	0	-	-	-
F	S13	-	-	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	0	-	0	x
	S14	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	x
	S15	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-
G	S16	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	-
	S17	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	-
	S18	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	-
H	S19	-	-	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	0	0	-
	S20	-	-	x	x	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x	-	-	0	0	-
	S21	-	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	0	-	0	-

Eine Übersicht über die Abkürzungen für die Verständnisse findet sich in Tab. 4
o/x: Verständnisse wurden der Person in dieser Sequenz zugewiesen und sind aus fachlicher Sicht eher angemessen (*o*) bzw. unangemessen (*x*), – Verständnis wurde keiner Äußerung zugewiesen

pen hinweg ein ähnlich heterogenes Bild: Zu einzelnen Aufgabenkarten können eine Reihe verschiedener Verständnisse rekonstruiert werden und auch hier gibt es Hinweise darauf, dass die Varianz zwischen den Gruppen groß ist und die Varianz innerhalb einzelner Gruppen übersteigt.

Die beobachtete Varianz nimmt auch nach der Informationskarte (Abb. 8) kaum ab, obwohl die Verständnisse zunehmen, die dem auf der Informationskarte mitgeteilten (fachlich angemessenen) Konzept entsprechen („o“ in Tab. 5). Diese Zunahme deutet darauf hin, dass die schriftliche Mitteilung von Konzepten zum Kompetenzaufbau zwar beiträgt, gleichzeitig aber die bereits vor der Informationskarte aktivierten unangemessenen Verständnisse („x“ in Tab. 5) auch nach der Information aktiviert und lediglich durch das fachlich angemessene Verständnis ergänzt werden. Auch im wiederholten Aufgreifen scheint sich keine eindeutige Stabilisierung in Richtung fachlich angemessener Konzepte zu zeigen (vgl. ähnliche Befunde in der Conceptual-Change-Forschung zum fachinhaltlichen Lernen, u. a. Duit und Treagust 2003).

Die Varianz der Verständnisse (insgesamt, für einzelne Schüler*innen und für bestimmte Aufgaben), die nicht eindeutige Wirkung der Informationen und die kaum erkennbare Stabilisierung machen es uns schwer, Hinweise auf eine Progression erster Art abzuleiten. Es stellt sich zudem die Frage, welche Bündelung der Verständnisse (die wir mit den Hauptkategorien bereits vorgenommen haben) überhaupt theoretisch und empirisch zulässig ist, und wo eine stärkere Verdichtung wichtige Stufen in der Verständnisenwicklung verschwinden lässt.

Die Varianz der Verständnisse nach der Informationskarte deutet zudem darauf hin, dass sich zur Bearbeitung der verschiedenen Aufgaben nach der Mitteilung des Konzepts aus Sicht der Schüler*innen vielfältige Verständnisse als brauchbar erweisen. Die Instruktion ist also insofern nicht kohärent, als dass sie in den darauffolgenden Aufgaben zwar die Nutzung der Information anregt (Stabilisierung anstrebt), aber in diesen Wiederholungen zu wenig sicherstellt, dass die Schüler*innen kritisch prüfen können, ob ihre Konstruktionen sachangemessen sind, also tatsächlich zur Information passen.

Im Zuge der qualitativen Analyse wurden nicht nur Verständnisse rekonstruiert, sondern ergänzend auch die Richtigkeit von Aussagen kodiert, die Entscheidungen dazu enthalten, ob eine Frage naturwissenschaftlich ist oder nicht. Auffällig ist hier, dass die Schüler*innen in insgesamt 435 untersuchten Entscheidungsprozessen 372 mal die richtige Entscheidung treffen (50 mal falsch, 13 mal unklar). Gleichzeitig rekonstruieren wir jedoch aus mehr als 20 % der zugehörigen Verbalisierungen Verständnisse, die eher *nicht* sachangemessen sind. Hier deutet sich an, dass es mit Blick auf die Progression zweiter Art (vgl. Abb. 1) zentral ist, sowohl die Progression von Wissensbeständen (die wir in der Varianz nicht gut erkennen können) als auch die Progression in Fähigkeiten (die in Bezug auf das Identifizieren nahezu abgeschlossen scheint) zu modellieren, anzuregen und deren Wechselbeziehungen zu untersuchen.

6 Zusammenfassende Diskussion und Ausblick

Der Sequenzierung der in diesem Projekt genutzten Instruktion liegen umfassende Annahmen zur Progression erster und zweiter Art zugrunde, die neben theoretischen Überlegungen u. a. auf empirischen Befunden zur Förderung von experimentbezogener Kompetenz sowie auf Befunden zum fachinhaltlichen Lernen basieren. Der schriftliche Prä-Post-Vergleich hat gezeigt, dass die Instruktion zu einem deutlichen Kompetenzzuwachs führt und deutet damit auch darauf hin, dass unsere Überlegungen zur Herstellung instruktionaler Kohärenz grundsätzlich geeignet sind. Unsere Ergebnisse der Analyse von Bearbeitungsprozessen zeigen gleichzeitig, dass sich der Kompetenzzuwachs in den von uns ausgewerteten Daten und mit den von uns gewählten methodischen Zugängen weder eindeutig nachweisen noch systematisch auf Prozessmerkmale der Bearbeitung unserer Instruktion beziehen.

Es ist davon auszugehen, dass sich an der großen Varianz, die in den bisher ausgewerteten Daten identifiziert wurde, auch nach einer Vergrößerung der Fallzahlen nicht grundsätzlich etwas ändern wird. Es mag sich zwar z. B. eine Häufung von bestimmten Verständnissen zeigen, die Vielfalt der gezeigten Verständnisse kann mit einer Vergrößerung des Datensatzes jedoch nur stabil bleiben oder sogar weiter zunehmen. Im Anliegen der Konstruktion eines spezifischen (ggf. mehrdimensionalen) Progressionsmodells muss in der Varianz geklärt werden, an welcher Stelle für das Lernen wichtige Zustände abgebildet werden, die für die Konstruktion und empirische Untersuchung einer Progression bedacht werden müssen. Gleichzeitig muss die Varianz im Konstruktionsanliegen aber reduziert werden, damit ein für die Entwicklung von Instruktionen handhabbares Modell entstehen kann. Wir sehen in der Balance dieser beiden Überlegungen eine zentrale Herausforderung für die Entwicklung von Progressionsmodellen und letztendlich auch für die Möglichkeiten, mit ihnen in zu erwartender Varianz Kohärenz herstellen zu können.

Der Befund, dass wir auch nach der Mitteilung eines Konzeptes ein breites Spektrum an unangemessenen Verständnissen bei den Lernenden identifizieren, verweist einmal mehr auf die begrenzte Wirkung von Erklärungen (vgl. Wittwer und Renkl 2008). In dieser Deutlichkeit hat uns der Befund insofern überrascht, als dass wir – gemäß unseren bisherigen empirischen Ergebnissen (vgl. von Aufschnaiter und Rogge 2010a, 2010b) – vorlaufende Explorationsphasen systematisch angelegt hatten, um die Schüler*innen für die Information inhaltlich zu sensibilisieren. Im Sinne eines konstruktivistischen Grundverständnisses war unsere Annahme, dass die Lernenden dadurch bereits intuitiv einen ersten Zugang zu den fachlich angemessenen Konzepten entwickeln, so dass die Information zu diesem Verständnis passt und entsprechend verarbeitet werden kann. Die Suche nach Merkmalen von Kohärenz sollte sich deshalb auch darauf richten, insbesondere das Wechselspiel von eigenaktiven Arbeitsphasen und darauf bezogenen, ggf. wiederholt abgegebenen, Informationen zu untersuchen, da die damit einhergehende Progression erster Art zentral für das Weiterlernen im Sinne einer Progression zweiter Art ist.

In der Nutzung von zwei ganz unterschiedlichen Datenquellen (schriftliche Testungen, Videodaten) zur Erfassung des Kompetenzaufbaus ist uns sehr deutlich geworden, welche Herausforderungen sich für die empirisch gestützte Modellierung von Progression ergeben. Prä-Post Messungen geben Auskunft über Fortschritt und

würden sich im Querschnitt auch anbieten, zu ersten Progressionsüberlegungen zu gelangen. Gleichzeitig aber deuten unsere Ergebnisse der Prozessanalysen (Aktivitäten, Verständnisse) klar darauf hin, dass sich dieser Fortschritt *nicht* eindeutig auf die Progressionsüberlegungen zurückführen lässt, die der Instruktion zugrunde lagen. Zudem konnten in den Analysen bisher keine neuen/anderen Merkmale identifiziert werden, die sich zur Beschreibung einer Progression eignen. Beides verweist darauf, dass weitere Prozesserhebungen erforderlich sind, um Modellierungen des Kompetenzaufbaus besser empirisch abzusichern. Eine Herausforderung wird dabei sein, methodische Zugänge zu finden, die die relevanten Prozessmerkmale hinreichend differenziert auflösen, gleichzeitig aber nur auf bestimmte Stellen in einem Datensatz zugreifen (also insb. nicht versuchen, den gesamten Arbeitsprozess abzubilden). Hier deutet sich an, dass geschickt angelegte Wiederholungen nicht nur für das Lernen wichtig sind, sondern auch forschungsmethodisch ein zentrales Instrument darstellen, weil sie Ankerstellen in Prozessdaten bilden können, an denen sich Progression besonders gut untersuchen lässt. Wir haben darauf bei der Instruktion nicht hinreichend geachtet, vermuten hier jedoch großes Potential für die Erfassung des Kompetenzaufbaus, und werden dies in zukünftigen Erhebungen stärker in den Blick nehmen.

Danksagung Wir bedanken uns bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), die das diesem Beitrag zugrundeliegenden Forschungsprojekt unter der Fördernummer AU 155/11-1 fördert. Darüber hinaus danken wir den Gutachter*innen für ihre umfassenden und konstruktiven Hinweise, die einen wesentlichen Beitrag zur Ausschärfung des Beitrags geleistet haben.

Literatur

- Alfieri, L., Brooks, P.J., Aldrich, N.J., & Tenenbaum, H.R. (2011). Does discovery-based instruction enhance learning? *Journal of Educational Psychology*, *103*(1), 1–18.
- Alonzo, A.C. (2012). Learning progressions: significant promise, significant challenge. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, *15*(1), 95–109.
- Alonzo, A.C., & v. Aufschnaiter, C. (2018). Moving beyond misconceptions: Learning progressions as a lens for seeing progress in student thinking. *The Physics Teacher*, *56*(7), 470–473.
- Arnold, J. C., Kremer, K., & Mayer, J. (2014). Understanding students' experiments—what kind of support do they need in inquiry tasks? *International Journal of Science Education*, *36*(16), 2719–2749.
- v. Aufschnaiter, C., & Hofmann, J. (2014). Kompetenz und Wissen: Wechselseitige Zusammenhänge und Konsequenzen für die Unterrichtsplanung. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, *67*(1), 10–16.
- v. Aufschnaiter, C., & Rogge, C. (2010a). Misconceptions or missing conceptions? *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, *6*(1), 3–18.
- v. Aufschnaiter, C., & Rogge, C. (2010b). Wie lassen sich Verläufe der Entwicklung von Kompetenz modellieren? *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *16*, 95–114.
- v. Aufschnaiter, C., & Rogge, C. (2012). How research on students' process of concept formation can inform curriculum development. In D. Jorde & J. Dillon (Hrsg.), *Science education research and practice in Europe. Retrospective and prospective* (S. 63–90). Rotterdam: Sense Publishers.
- Blömeke, S., Gustafsson, J.-E., & Shavelson, R.J. (2015). Beyond dichotomies. *Zeitschrift für Psychologie*, *223*(1), 3–13.
- Duit, R., & Treagust, D.F. (1998). Learning in science—From behaviourism towards social constructivism and beyond. In I.B.J. Fraser & K.G. Tobin (Hrsg.), *International Handbook of Science Education* (S. 3–25). Dordrecht: Springer.
- Duit, R., & Treagust, D.F. (2003). Conceptual change: a powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, *25*(6), 671–688.
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M., & Parchmann, I. (2012). The Model of Educational Reconstruction. A framework for improving teaching and learning science. In D. Jorde &

- J. Dillon (Hrsg.), *Science education research and practice in Europe. Retrospective and prospective* (S. 13–37). Rotterdam: Sense Publishers.
- Emden, M., & Sumfleth, E. (2016). Assessing students' experimentation processes in guided inquiry. *International Journal of Science and Mathematics Education*, *14*(1), 29–54.
- Grube, C. R. (2011). Kompetenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung. Untersuchung der Struktur und Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens bei Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I. Dissertation. Universität Kassel, Kassel. <https://kobra.bibliothek.uni-kassel.de/bitstream/urn:nbn:de:hebis:34-2011041537247/3/DissertationChristianeGrube.pdf>. Zugegriffen: 7. März 2014.
- Gut, C., Metzger, S., Hild, P., & Tardent, J. (2014). *Problemtypenbasierte Modellierung und Messung experimenteller Kompetenzen*. PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2014, Frankfurt.
- Hadenfeldt, J. C., & Neumann, K. (2012). Die Erfassung des Verständnisses von Materie durch Ordered Multiple Choice Aufgaben. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *18*, 317–338.
- Hammann, M., Phan, T. T. H., Ehmer, M., & Bayrhuber, H. (2006). Fehlerfrei Experimentieren. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, *59*(5), 292–299.
- Hartig, J., & Klieme, E. (2006). Kompetenz und Kompetenzdiagnostik. In K. Schweizer (Hrsg.), *Leistung und Leistungsdiagnostik* (S. 127–143). Heidelberg: Springer.
- Kalthoff, B., Theyssen, H., & Schreiber, N. (2018). Explicit promotion of experimental skills. And what about the content-related skills? *International Journal of Science Education*, *93*(2), 1305–1326.
- Klieme, E., Avenarius, H., Blum, W., Döbrich, P., Gruber, H., Prenzel, M., et al. (2007). Zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards. https://www.bmbf.de/pub/Bildungsforschung_Band_1.pdf. Zugegriffen: 22. Juni 2017.
- KMK (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10)*. München: Luchterhand.
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. Bd. 12. Weinheim: Beltz.
- Neumann, K., Kauertz, A., Lau, A., Notarp, H., & Fischer, H. E. (2007). Die Modellierung physikalischer Kompetenz und ihrer Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *13*, 101–121.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., & Fischer, H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of Research in Science Teaching*, *50*(2), 162–188.
- Neuweg, G. H. (2002). Lehrerhandeln und Lehrerbildung im Lichte des Konzepts des impliziten Wissens. *Zeitschrift für Pädagogik*, *48*(1), 10–29.
- Osborne, J. F., Henderson, J. B., MacPherson, A., Szu, E., Wild, A., & Yao, S.-Y. (2016). The development and validation of a learning progression for argumentation in science. *Journal of Research in Science Teaching*, *53*(6), 821–846.
- Renkl, A. (2012). Modellierung von Kompetenzen oder von interindividuellen Kompetenzunterschieden. *Psychologische Rundschau*, *63*(1), 50–53.
- Rogge, C. (2010). *Entwicklung physikalischer Konzepte in aufgabenbasierten Lernumgebungen*. Berlin: Logos.
- Ropohl, M., Walpuski, M., & Sumfleth, E. (2015). Welches Aufgabenformat ist das richtige? – Empirischer Vergleich zweier Aufgabenformate zur standardbasierten Kompetenzmessung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*. <https://doi.org/10.1007/s40573-014-0020-6>.
- Schecker, H., & Parchmann, I. (2006). Modellierung naturwissenschaftlicher Kompetenz. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *12*, 45–66.
- Ufer, S., & Neumann, K. (2018). Measuring competencies. In F. Fischer, C. Hmelo-Silver, S. Goldman & P. Reimann (Hrsg.), *International handbook of the learning sciences* (S. 433–443). New York: Routledge.
- Vorholzer, A. (2016). *Wie lassen sich Kompetenzen des experimentellen Denkens und Arbeitens fördern? Eine empirische Untersuchung eines expliziten und eines impliziten Instruktionsansatzes*. Bd. 197. Berlin: Logos.
- Vorholzer, A. (im Druck). *Erträge didaktischer Rekonstruktion für Forschung und Unterricht am Beispiel von Lernaufgaben zum experimentellen Denken und Arbeiten*. Herausforderung Lehrer_innenbildung.
- Vorholzer, A. & v. Aufschnaiter, C. (im Druck). Dimensionen und Ausprägungen fachinhaltlicher Kompetenz in den Naturwissenschaften – ein Systematisierungsversuch. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*.
- Vorholzer, A., & v. Aufschnaiter, C. (2019). Guidance in inquiry-based instruction—an attempt to disentangle a manifold construct. *International Journal of Science Education*, *41*(11), 1562–1577.

- Vorholzer, A., v. Aufschnaiter, C., & Boone, W.J. (2018). Fostering upper secondary students' ability to engage in practices of scientific investigation. a comparative analysis of an explicit and an implicit instructional approach. *Research in Science Education*. <https://doi.org/10.1007/s11165-018-9691-1>.
- Vorholzer, A., v. Aufschnaiter, C., & Kirschner, S. (2016). Entwicklung und Erprobung eines Tests zur Erfassung des Verständnisses experimenteller Denk- und Arbeitsweisen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 22(1), 25–41.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Cambridge: Harvard University Press.
- Weinert, F.E. (2000). Lehren und Lernen für die Zukunft – Ansprüche an das Lernen in der Schule. *Pädagogische Nachrichten Rheinland-Pfalz*, 2, 1–16.
- Weinert, F.E. (Hrsg.). (2001). *Leistungsmessungen in Schulen*. Weinheim: Beltz.
- Wellnitz, N., Fischer, H. E., Kauertz, A., Mayer, J., Neumann, I., Pant, H. A., et al. (2012). Evaluation der Bildungsstandards – eine fächerübergreifende Testkonzeption für den Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 261–291.
- Wittwer, J., & Renkl, A. (2008). Why instructional explanations often do not work: a framework for understanding the effectiveness of instructional explanations. *Educational Psychologist*, 43(1), 49–64.
- Wittwer, J., & Renkl, A. (2010). How effective are instructional explanations in example-based learning? A meta-analytic review. *Educational Psychology Review*, 22(4), 393–409.
- Yao, J.-X., Guo, Y.-Y., & Neumann, K. (2017). Refining a learning progression of energy. *International Journal of Science Education*, 39(17), 2361–2381.