

Idealisierungen und Modelle im Physikunterricht

Jan Winkelmann

Goethe-Universität Frankfurt am Main, Institut für Didaktik der Physik,
Max-von-Laue Straße 1, 60438 Frankfurt am Main
winkelmann@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Die folgenden Überlegungen sollen einen Beitrag zur Klärung der Begriffe Idealisierung und Modell in der Physik und im Physikunterricht leisten. Im allgemeinen Umgang mit Modellen finden sich viele Begriffe, die möglicherweise das Gleiche oder nur Ähnliches beschreiben: modellieren, Situationsmodellierung, Modellkonstruktion, Idealisierung, Repräsentation, Modellbildung, Arbeiten mit Modellen, hinzu kommen englische Bezeichnungen wie (scientific) modeling, modeling based teaching, theoretical und instructional approach (...). Eine hilfreiche Strukturierung bieten Überlegungen zur Erfassung von Modellkompetenz aus der Biologie- und Physikdidaktik (Digel, Scheid, & Kauertz, 2018; Krüger, Kauertz, & Upmeyer zu Belzen, 2018). Dabei gehen diese Strukturierungen bereits von bestehenden Modellen zur Erklärung eines Phänomens aus. Um aber ein physikalisches Phänomen oder Problem modellieren zu können, müssen im Vorfeld Idealisierungen vorgenommen werden. Diese Reflexion über die Genese von Modellen mittels Idealisierung erscheint bisher nicht genügend Beachtung innerhalb der Naturwissenschaftsdidaktiken zu erhalten.

Der Fokus dieses Beitrags liegt daher auf dem Bereich der Konstruktion von Modellen, indem Idealisierungen verwendet werden. Hierfür wird eine Kategorisierung angeboten, die auf Hüttemann (2012) zurückgeht. Exemplarisch wird die Kategorisierung an einem Beispiel aus der Optik vorgestellt, wobei sie auf alle Teilbereiche der Physik anwendbar ist.

1. Hintergrund

Erkenntnisse in der Wissenschaft aggregieren sich in Theorien und Modellen. Experimente überprüfen die theoretischen Überlegungen oder stoßen neue Modellierungen an. Sowohl Theorien als auch Modelle verfolgen das Ziel, beobachtete Phänomene zu beschreiben und zu erklären sowie Vorhersagen über das beobachtete Verhalten zu formulieren. Dabei ist es nicht trivial, zwischen Theorie und Modell zu differenzieren. Über das tatsächliche Verhältnis von Modell und Theorie sind sich Wissenschaftstheoretiker nicht einig. Viele Fachwissenschaftlerinnen und Fachwissenschaftler vertreten die Auffassung, dass Theorien das allgemeinere Konstrukt seien und Modelle diese Theorien ergänzten (Bailer-Jones, 2002). Leicht nachvollziehbar ist, dass auch Schülerinnen und Schülern eine Differenzierung schwerfällt (Reinisch & Krüger, 2014).

Im schulischen Kontext wird die Beschäftigung mit Modellen mit dem Feld „Nature of Science“ und damit einem wesentlichen Aspekt des Kompetenzbereichs Erkenntnisgewinnung verbunden (Allchin, 2011; Irzik & Nola, 2011; Lederman, 2007; Schwarz et al., 2009). Seit einigen Jahren besteht die Forderung, dass dieser Kompetenzbereich explizit Gegenstand des Physikunterrichts sein soll, wozu es bereits Unterrichtsvorschläge gibt (Höttecke, 2008; KMK, 2004; Lederman, Antink, & Bartos, 2014).

Es gibt viele Studien zum Modellverständnis von Schülerinnen und Schülern, wobei deren Fokus häufig auf dem Arbeiten *mit* Modellen liegt (Gilbert & Justi, 2016; Gobert et al., 2011; Oh & Oh, 2011; Rönnebeck, Bernholt, & Ropohl, 2016). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Schülerinnen und Schüler einige Schwierigkeiten in der Beschäftigung mit Modellen haben. Dies deckt sich mit normativen Überlegungen schwierigkeiterzeugender Merkmale des Physikunterrichts (Fruböse, 2010) und wird von Schülerinnen und Schülern selbst auch entsprechend wahrgenommen (Fareed & Winkelmann, 2019, in diesem Band: DD 2.11).

Bisher ist wenig darüber bekannt, was genau Schülerinnen und Schüler unter Modellen verstehen – was zugegebenermaßen sehr schwierig ist, wenn sich selbst viele Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nicht einig darüber sind. Zukünftige Studien sollten daher weitere Aspekte des Modellverständnisses in den Blick nehmen, z.B. die Konstruktion von Modellen oder das Verhältnis von Modell und Theorie (Gilbert & Justi, 2016; Louca & Zacharia, 2012; Sandoval, 2005).

Einen Vorschlag, wie Theorien, Modelle und Experimente in Beziehung zueinander verstanden werden könnten, bietet Abbildung 1. Hierbei wird keine Aussage über den Beginn eines Erkenntnisprozesses ge-

troffen (im Gegensatz zu einer induktivistischen Perspektive, die das Experimentieren als Ausgangspunkt nehmen würde). Vielmehr ist die Bedeutung der Beziehung zwischen Experiment und Theorie – und damit auch zwischen Experiment und Modell – als wechselseitige Überprüfung zu verstehen.



Abb. 1: Mögliche Beziehung zwischen Theorie, Modell und Experiment.

2. Modelle – der Blick der Naturwissenschaftsdidaktik

Modelle sind seit vielen Jahren Gegenstand naturwissenschaftsdidaktischer Forschung. In diesem Beitrag wird daher lediglich auf einige aktuelle Arbeiten Bezug genommen.

Eine umfangreiche und scharfsinnige Annäherung an das, was in der Naturwissenschaftsdidaktik ein Modell sein könnte, findet sich aktuell bei (Wagner, 2018). In seiner Festlegung des Begriffs „Modell“ differenziert Wagner zwischen einem Modell und der jeweiligen Repräsentationsform und legt Wert auf die notwendigerweise zu betrachtende Zweckmäßigkeit eines Modells (Ebd., S. 28).

Weitere Struktur bieten aktuelle Überlegungen aus der Biologie- und Physikdidaktik zur *Modellkompetenz* (Digel, 2018; Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010) sowie *Prozessbeschreibungen* während der Beschäftigung mit Modellen (Gilbert & Justi, 2016; Krell, Upmeier zu Belzen, & Krüger, 2016). Beide Beschreibungen (Modellkompetenz und Prozessbeschreibung) umfassen Bereiche der Konstruktion von Modellen sowie den Umgang mit Modellen.

An dieser Stelle sei auf eine Schwierigkeit bezüglich der häufig gewählten Begrifflichkeiten hingewiesen. Zwar wird nachvollziehbar zwischen einer Herstellungsperspektive und einer Anwendungsperspektive bezüglich der Beschäftigung mit Modellen unterschieden, jedoch wird zum Beispiel die Anwendungsperspektive mit dem Begriff der Modellbildung verknüpft (z.B. Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010, S. 53). Der Begriff Bildung kann zumindest doppeldeutig verstanden werden. Zum einen kann darunter ein Konstruktionsprozess verstanden werden („Ich bilde / erschaffe / konstruiere mir ein Modell.“). In diesem Sinne wäre Modellbildung der Herstellungsperspektive zuzuordnen. Zum anderen kann Bildung als Erkenntnisprozess verstanden werden („Ich bilde mich, indem ich Modelle anwende oder teste.“). In diesem Sinne wäre Modellbildung der Anwendungsperspektive zuzuordnen.

Der Begriff „modellieren“ wird oft sehr unterschiedlich verstanden, mal als Kenntnis über die Eigenschaften eines Modells, mal als die eigentliche Arbeit mit Modellen und manchmal gar als eine sämtliche Aspekte der Beschäftigung mit Modellen umfassendes Tätigkeit. Wenn dann noch Begriffe der englischen Sprache hinzukommen (modeling, modeling-based ...), wird schnell unklar, auf welchen Aspekt der Beschäftigung mit Modellen aktuell fokussiert wird. Hier wäre eine schärfere (sprachliche) Differenzierung wünschenswert.

3. Idealisierungen

Sämtlichen Prozessen der Erkenntnisentwicklung liegen Idealisierungen zu Grunde. Sei es beim Experimentieren, bei dem ein (Natur-)Phänomen im Labor unter idealen Bedingungen untersucht wird oder bei der Beschäftigung mit Modellen, während der lediglich die interessierenden Aspekte des Phänomens in den Blick genommen werden. In Anlehnung an vorangegangene Überlegungen zur Beziehung zwischen Theorie, Modell und Experiment verdeutlicht dies der gelbe Kasten „Idealisierungen“ in Abbildung 2.

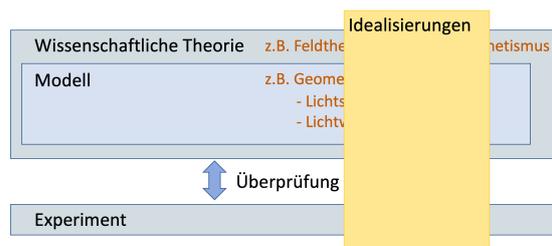


Abb. 2: Idealisierungen finden in allen Bereichen der Erkenntnisgewinnung statt.

Diese Tatsache ist Physikerinnen und Physikern nicht neu und auch Physiklehrkräfte werden davon berichten können, dass sie in ihrem Unterricht an ganz unterschiedlichen Stellen idealisieren, zum Beispiel bei der (Luft)-Reibung in der Mechanik oder bei dünnen Linsen in der Optik.

Um das Modellverständnis von Schülerinnen und Schülern (auch von Studierenden) zu steigern, sollte vermittelt werden, wie man zu einem Modell gelangt, nämlich unter Zuhilfenahme von Idealisierungen. Die zu Grunde liegende These dieses Beitrags lautet entsprechend: Idealisierungen sollten häufiger als bisher explizit in der Lehre identifiziert und reflektiert werden, um ein verbessertes Modellverständnis bei Schülerinnen und Schülern zu erzielen.

Um diesem Anspruch gerecht werden zu können, ist eine Definition von Idealisierung notwendig. Zusätzlich wird im Folgenden ein Kategoriensystem angeboten, mit dessen Hilfe verschiedene Idealisierungen voneinander unterschieden werden können. Schließlich wird dieses Kategoriensystem am Beispiel der Idealisierung „dünne Linse“ veranschaulicht.

3.1 Definition

Als Definition dessen, was hierbei unter Idealisierungen verstanden werden soll, werden im Folgenden zwei Vorschläge aus der Wissenschaftsphilosophie genutzt:

- Eine Idealisierung ist die Zerlegung eines gegebenen Phänomens. Als nebensächlich beurteilte Eigenschaften werden ausgeschlossen. Nur die Eigenschaften bleiben übrig, die als wesentlich für das Ziel des Modells empfunden werden (Nowak & Nowak, 1998).
- Während des Prozesses des Idealisierens ist die Annahme der Optimierung grundlegend. So verstanden handelt es sich bei Idealisierungen um gewollte Ersetzungen. Damit werden verfälschende Annahmen bewusst akzeptiert (Hüttemann, 2012; Strevens, 2017).

Idealisierungen haben also zwei miteinander in Zusammenhang stehende Charaktereigenschaften. Zum einen beschränken sich Idealisierungen auf das Wesentliche. Hierbei hängt es von der Fragestellung ab, was jeweils wesentlich ist. Zum anderen stellen Idealisierungen stets eine bewusst verfälschende Ersetzung dar. Unbestritten bleibt trotz dieser Verfälschung eine mögliche Bewertung von konstruierten Modellen hinsichtlich der Zweckmäßigkeit gerechtfertigt, wenn nicht sogar notwendig – und nicht mit Blick darauf, ob diese Modelle „richtig“ oder „falsch“ sind.

3.2 Kategoriensystem

Eine weitergehende Analyse von Idealisierungen und deren Ziele betreibt Hüttemann (2012). Er unterscheidet in seiner Arbeit zwischen acht Kategorien von Idealisierungen. Die Kategorien unterscheiden sich mit Blick auf das jeweilig verfolgte Ziel (Tabelle 1). Hierbei handelt es sich nicht um eine Rangliste. Gleichwohl lässt sich ein qualitativer Unterschied zwischen den ersten vier und den letzten vier Kategorien feststellen. Fokussieren die ersten vier Kategorien auf die experimentelle Annäherung an ein zu untersuchendes Phänomen (grau hinterlegt), so handelt es sich bei den vier übrigen Kategorien um Idealisierungen, die die Konstitution von Modellen betreffen.

Kategorien von Idealisierungen	Ziel der Idealisierung
Präparation, Herstellung, Aufbereitung	Konstitution des Untersuchungsgegenstands:
Isolation, Abschirmung	Messungen vornehmen, theoretische Behandlung erreichen
Datenextrapolation und Datenberichtigung	Repräsentation des Gegenstands und seines Verhaltens, um zu einem theoretischen Verständnis zu gelangen

Mathematische Vereinfachung	Eine Gleichung auf einfache Art und Weise lösbar machen.
Abstraktion eines physikalischen Systems	Aufteilung eines physikalischen Systems in getrennt zu betrachtende Teilsysteme
Abstraktion von Eigenschaften	Bestimmte Eigenschaften nicht berücksichtigen.
Idealisierung im engeren Sinne: Einem physikalischen System Eigenschaften zuschreiben, die es offensichtlich nicht hat.	Mathematische und zeichnerische Handhabbarkeit erreichen.
Vereinfachung oder Vernachlässigung	Funktionale Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Eigenschaften oder Größen werden hergestellt.

Tab. 1: Kategorien und Ziele von Idealisierungen

3.3 Beispiel „dünne Linse“

Eine übliche Idealisierung in der Optik ist die Untersuchung von Lichtwegen an „dünnen Linsen“. Die Vielzahl an Idealisierungen, die bei diesem Beispiel zum Tragen kommen, wird in Tabelle 2 illustriert.

Kategorie	Idealisierung
Präparation	Streuung auf <i>weißem Hintergrund</i>
Isolation	<i>Abdunkeln</i> des Raums
Datenberichtigung	<i>Paraxiale Lichtwege</i> - Fehlerbetrachtung bei Randstrahlen
Abstraktion physikalischer Systeme	- Konzentration auf <i>Lichtbrechung</i> - <i>Lichtstreuung</i> ignorieren - <i>Lichtreflexion</i> ignorieren
Abstraktion von Eigenschaften	- Einzelne <i>Lichtwege statt Lichtbündel</i> - <i>Geometrische Optik</i> statt Wellen- oder Quantenmodell
Idealisierung im engeren Sinne	Brechung an <i>Mittelebene</i> : zeichnerische Handhabbarkeit
Vereinfachung	<i>Ausgewählte Lichtwege</i> (z.B. durch den Mittelpunkt oder Brennpunkt)

Tab. 2: Veranschaulichung der Kategorien von Idealisierungen am Beispiel der „dünnen Linse“.

Über die vorgeschlagene Zuordnung lässt sich diskutieren, allerdings geht es nicht um eine „richtige“ Zuordnung. Vielmehr erscheint das Nachdenken über

die vielfältigen Idealisierungen, z.B. anhand des Kategoriensystems hilfreich, um über die Konstruktion von Modellen zu reflektieren.

4. Fazit und Ausblick

Die Beschäftigung mit Modellen findet im Physikunterricht ständig statt. Allerdings werden Modelle dabei häufig implizit verwendet. Es zeigt sich, dass Schülerinnen und Schüler im Umgang mit Modellen Lernschwierigkeiten haben. Zudem wird von Schülerinnen und Schülern unter anderem das Arbeiten mit Modellen als schwierigkeiterzeugend im Physikunterricht wahrgenommen. Gründe hierfür können das erhöhte Abstraktionsniveau von Modellen sowie eine sehr fachspezifische Sprache sein. Möglicherweise spielt auch ein mangelndes Verständnis über das Zustandekommen verwendeter Modelle eine Rolle.

Ein Aspekt, der als unterstützend angenommen werden darf, sowohl für das Modellverständnis von Schülerinnen und Schülern, als auch für die Kommunikation innerhalb der Fachdidaktik, ist eine eindeutige Sprache. Zielführend erscheint es, prägnant zu beschreiben, welcher Prozess im Umgang mit Modellen mit den von einem selbst verwendeten Begriffen gemeint ist. Ein Wort wie „modellieren“, ist häufig nicht eindeutig. Möglichkeiten präziser Beschreibungen bieten aktuelle Überlegungen von Modellkompetenz. Ein weiterer Aspekt betrifft die Konstruktion von Modellen. Wie gezeigt wurde, sind Idealisierungen hierfür notwendig. Eine Reflexion über die Konstruktion von Modellen und das damit einhergehende Idealisieren findet bisher nicht in ausreichendem Maße statt. Eine explizite Auseinandersetzung mit Idealisierungen erscheint daher notwendig.

Mit der Zuordnung von Idealisierungen zu verschiedenen, in diesem Beitrag vorgestellten, Kategorien ist nicht intendiert, die einzig richtige Klassifizierung zu finden oder gar zu erlernen. Vielmehr kann das Kategoriensystem eine Orientierung für die Reflexion des Konstruktionsprozesses von Modellen darstellen.

Derzeit ist eine Lehrkräftebefragung zur Klärung, ob die Kategorien eine sinnvolle Auseinandersetzung mit Idealisierungen anbahnen können, in Vorbereitung. Darüber hinaus wird eine Bedarfsanalyse für eine Fortbildung durchgeführt, die eine Verbesserung der Modellkompetenz zum Gegenstand hat. Dabei sollen auch digitale Hilfsmittel wie Augmented Reality zum Tragen kommen, da in der Nutzung digitaler Unterstützung das Potential gesehen wird, eine Verknüpfung zwischen Experiment und Modell zu ermöglichen. Außerdem sollen in dieser umfangreichen Fortbildung zu Idealisierungen und Modellen die Wirkungen auf das Modellverständnis bei Schülerinnen und Schülern untersucht werden. Die Fortbildung wird sich an Lehramtsstudierende, Lehrkräfte im Vorbereitungsdienst sowie an Lehrkräfte im Schuldienst richten.

Im Rahmen einer zweiten Studie ist vorgesehen, die Lernentwicklung von Schülerinnen und Schülern mit

Blick auf deren Modellkompetenz zu untersuchen. Variiert wird in dieser Studie der Grad der Integration von Modell und Experiment mit Hilfe von Augmented Reality sowie der Grad der Schüleraktivität.

5. Literatur

- Allchin, D. (2011). Evaluating knowledge of the nature of (whole) science. *Science Education*, 95(3), 518–542.
<https://doi.org/10.1002/sce.20432>
- Bailer-Jones, D. M. (2002). Scientists' Thoughts on Scientific Models. *Perspectives on Science*, 10(3), 275–301.
<https://doi.org/10.1162/106361402321899069>
- Digel, S. (2018). *Messung von Modellierungskompetenz in Physik – Theoretische Herleitung und empirische Prüfung eines Kompetenzmodells physikspezifischer Modellierungskompetenz*. Universität Koblenz-Landau.
- Digel, S., Scheid, J., & Kauertz, A. (2018). Modellieren beim Problemlösen – Untersuchung prozeduraler Kompetenz. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualitätvoller Chemie- und Physikunterricht – normative und empirische Dimensionen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Regensburg 2017* (S. 289–292). Universität Regensburg.
- Fareed, B., & Winkelmann, J. (2019). Schülerwahrnehmung von Schwierigkeit des Physikunterrichts und der kognitiven Aktivierung durch die Lehrkraft. In H. Grötzebauch & V. Nordmeier (Hrsg.), *PhyDid B – Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung des Fachverbands Didaktik der Physik in Aachen 2019*. DD 2.11.
- Früböse, C. (2010). Der ungeliebte Physikunterricht. *Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht*, 63(7), 388–392.
- Gilbert, J., & Justi, R. (2016). *Modelling-based teaching in science education*. Abgerufen von <http://public.ebib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=4534015>
- Gobert, J. D., O'Dwyer, L., Horwitz, P., Buckley, B. C., Levy, S. T., & Wilensky, U. (2011). Examining the Relationship Between Students' Understanding of the Nature of Models and Conceptual Learning in Biology, Physics, and Chemistry. *International Journal of Science Education*, 33(5), 653–684.
<https://doi.org/10.1080/09500691003720671>
- Höttecke, D. (Hrsg.). (2008). Themenheft Was ist Physik - Über die Natur der Naturwissenschaften unterrichten. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik*, 19 (Heft 103)(3).
- Hüttemann, A. (2012). *Idealisierungen und das Ziel der Physik: Eine Untersuchung zum Realismus, Empirismus und Konstruktivismus in der Wissenschaftstheorie*. Abgerufen von <https://doi.org/10.1515/9783110811896>

- Irzik, G., & Nola, R. (2011). A family resemblance approach to the nature of science for science education. *Science & Education*, 20, 591–607.
- KMK, Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland. (2004). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*. Abgerufen von https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf
- Krell, M., Upmeier zu Belzen, A., & Krüger, D. (2016). Modellkompetenz im Biologieunterricht. In A. Sandmann & P. Schmiemann (Hrsg.), *Biologiedidaktische Forschung: Schwerpunkte und Forschungsstände* (S. 83–102). Berlin: Logos Verlag Berlin.
- Krüger, D., Kauertz, A., & Upmeier zu Belzen, A. (2018). Modelle und das Modellieren in den Naturwissenschaften. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 141–157). https://doi.org/10.1007/978-3-662-56320-5_9
- Lederman, N. G. (2007). Nature of science: past, present, future. In S. Abell (Hrsg.), *Handbook of research on science education* (S. 831–879). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Lederman, N. G., Antink, A., & Bartos, S. (2014). Nature of Science, Scientific Inquiry, and Socio-Scientific Issues Arising from Genetics: A Pathway to Developing a Scientifically Literate Citizenry. *Science & Education*, 23(2), 285–302. <https://doi.org/10.1007/s11191-012-9503-3>
- Louca, L. T., & Zacharia, Z. C. (2012). Modeling-based learning in science education: cognitive, metacognitive, social, material and epistemological contributions. *Educational Review*, 64(4), 471–492. <https://doi.org/10.1080/00131911.2011.628748>
- Nowak, I., & Nowak, L. (1998). “Model(s)” and “Experiment(s) as Homogeneous Families of Notions. In N. Shanks & J. Brzeziński (Hrsg.), *Idealization in contemporary physics* (S. 35–50). Amsterdam: Rodopi.
- Oh, P. S., & Oh, S. J. (2011). What Teachers of Science Need to Know about Models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109–1130. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.502191>
- Reinisch, B., & Krüger, D. (2014). Vorstellungen von Studierenden über Gesetze, Theorien und Modelle in der Biologie. *Erkenntnisweg Biologiedidaktik*, 13, 41–56.
- Rönnebeck, S., Bernholt, S., & Ropohl, M. (2016). Searching for a common ground – A literature review of empirical research on scientific inquiry activities. *Studies in Science Education*, 52(2), 161–197. <https://doi.org/10.1080/03057267.2016.1206351>
- Sandoval, W. A. (2005). Understanding students’ practical epistemologies and their influence on learning through inquiry. *Science Education*, 89(4), 634–656. <https://doi.org/10.1002/sce.20065>
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., ... Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632–654. <https://doi.org/10.1002/tea.20311>
- Stevens, M. (2017). How Idealizations Provide Understanding. In S. R. Grimm, C. Baumberger, & S. Ammon (Hrsg.), *Explaining understanding: new perspectives from epistemology and philosophy of science* (S. 37–39). New York ; London: Routledge, Taylor & Francis Group.
- Upmeier zu Belzen, A., & Krüger, D. (2010). Modellkompetenz im Biologieunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 16, 41–57.
- Wagner, S. (2018). *Erklärung physikalischer Phänomene mit Modellen* (PhD Thesis, Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät). <https://doi.org/10.18452/18655>