

Lernen durch Modellieren: Ziele, Ansätze und Praktiken

02.1 EIN SCOPING REVIEW ZUM AKTUELLEN STAND DER
FORSCHUNG ZUM MODELLBASIERTEM LERNEN IM
NATURWISSENSCHAFTLICHEN UNTERRICHT.



2026



Empowering Teachers for Science Learning
Through Modelling-Based Approaches

LEHRKRÄFTE FÜR DAS MODELLIEREN IM NATURWISSENSCHAFLICHEN UNTERRICHT BEFÄHIGEN

Tom Bielik (RU), Felicitas Haupts (IPN), Wouter van Joolingen (UU), Moritz Krell (IPN), Kim Krijtenburg-Lewerissa (UU), Kim Lobner (IPN), Victor Lopez Simo (UAB), Loucas Louca (EUC), Marios Papaevripidou (UCY), Kyriaki Vakkou (UCY).

Inhalt

Einleitung.....	1
Methode.....	2
Ergebnisse	3
Frameworks zur Modellierkompetenz.....	3
Förderbedarfe bei Schüler*innen im Bereich des Modellierens.....	6
Themenbereiche	
Tools.....	14
Gesamtfazit und Diskussion	18
Literatur.....	19

Einleitung

Das vorliegende Scoping Review soll einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zum modellbasierten Lernen (MbL) geben. Hierfür wurden die verwendeten Unterrichts- bzw. Instruktionsansätze, die Themenbereiche, die genutzten Tools, das Alter der Lernenden sowie die erwarteten Lernergebnisse beleuchtet. Modellieren als Lernaktivität gibt es bereits seit den 1980er Jahren (Gilbert & Justi, 2016), wie die Arbeiten von Jon Ogborn (Ogborn & Wong, 1984) und weiteren Autoren zeigen. Seitdem hat sich das Thema stetig weiterentwickelt, sowohl hinsichtlich der theoretischen Erkenntnisse zur Rolle des Modellierens im Unterricht als auch bei der Entwicklung von Tools und Methoden (z. B. Constantinou et al., 2019; Louca & Zacharia, 2012).

In diesem Review werden die neuesten Entwicklungen in der Forschung zum MbL zusammengefasst. Dabei liegt der Fokus auf mehreren Aspekten: die erwarteten und beobachteten Lernziele für MbL, die (didaktischen) Ansätze bei der Umsetzung von MbL, die verwendeten Tools und die Themenbereiche, in denen MbL angewendet wurde. Diese Aspekte wurden im Kontext des naturwissenschaftlichen Unterrichts für die Altersgruppe von 5 bis 15 Jahren untersucht, die zugleich die Zielgruppe des EMPOWER Projektes darstellt. Um das Review thematisch einzuordnen, werden zunächst die wichtigsten Konzepte im Zusammenhang mit MBL definiert. Eines der wichtigsten Konzepte ist das *Modell* an sich. Es wird folgendermaßen definiert:

Ein Modell ist eine idealisierte Repräsentation, die dazu dient, ein Phänomen zu verstehen, vorherzusagen oder zu erklären.

Diese Definition beschreibt im Allgemeinen die Eigenschaften und Funktionen von Modellen im wissenschaftlichen Kontext. Modelle sind demnach: virtuelle oder physische Objekte, die Forschende konstruieren, um die von ihnen erforschten Phänomene zu repräsentieren. Dazu gehören unter anderem maßstabsgetreue Modelle, Bilder, schematische Darstellungen oder Computersimulationen. Weiterhin werden Modelle verwendet, um das Phänomen zu verstehen, zu erklären und vorherzusagen, indem Aussagen über das dargestellte Phänomen aus dem Modell abgeleitet werden.

Ausgehend von dieser Definition wird nachfolgend das wissenschaftliche Modellieren definiert:

Wissenschaftliches Modellieren ist der iterative Prozess des Konstruierens, Vergleichens, Testens, Überarbeitens und Anwendens von Modellen bei der Erforschung von Phänomenen.

In dieser Definition wird das Wort „wissenschaftlich“ hinzugefügt, um zu verdeutlichen, dass Modellieren eine erkenntnistheoretische Tätigkeit ist, die zu einem tieferen Verständnis des erforschten Phänomens führen soll.

Abschließend wird MbL wie folgt definiert:

Modellbasiertes Lernen ist ein Lehr- und Lernansatz, bei dem Schüler*innen das wissenschaftliche Modellieren umsetzen.

Aus den drei Definitionen lässt sich schließen, dass MBL eine Lehr- und Lernaktivität ist, bei der sich Schüler*innen mit einem Prozess des Konstruierens, Vergleichens, Testens, Überarbeitens und Anwendens von Modellen beschäftigen, um Phänomene zu verstehen, zu erklären oder vorherzusagen. Das Ziel von MBL umfasst typischerweise zwei Aspekte: den Aufbau von Fachwissen zum Phänomen sowie den Aufbau von *Modellierkompetenz*. *Modellierkompetenz* beinhaltet die Fähigkeit zum Modellieren sowie ein tieferes Verständnis von Modellen, welches auch als Metamodellierwissen bezeichnet wird.

Um die neuesten Entwicklungen in der Forschung zum MBL zusammenzutragen, konzentriert sich das Review auf die folgenden Forschungsfragen:

1. Welche Frameworks für Modellierkompetenz sind relevant und wie unterscheiden sie sich in Abhängigkeit des Alters der Zielgruppe (d.h. Schüler*innen im Alter zwischen 5 und 15 Jahren)?
2. Welche didaktischen Ansätze für MBL werden in der Literatur für Schüler*innen im Alter von 5 bis 15 Jahren vorgeschlagen und was ist über ihre Wirksamkeit bekannt?
3. Welche Themenbereiche, Kontexte und Phänomene werden beim MBL behandelt?
4. Welche Tools (spezielle Modellierwerkzeuge, generische Werkzeuge und/oder KI-Werkzeuge) werden beim praktischen Modellieren eingesetzt?

Methodik

Da es sich bei der vorliegenden Studie um ein Scoping-Review handelt, welches sich auf aktuelle Entwicklungen konzentriert, wurde ein pragmatischer Ansatz gewählt. Zunächst wurden sieben aktuelle Übersichtsstudien zusammengefasst (Chang et al., 2024; Jin & Jian, 2024; Langbeheim & Bielik, 2025; Lobner et al., eingereicht; Louca & Zacharia, 2012; Margolin et al., 2022; Nicolaou & Constantinou, 2014a), die für die Beantwortung der Forschungsfragen relevant sind und die Grundlage für dieses Review bilden. Anschließend wurde nach aktueller Literatur aus den Jahren 2020 bis 2025 gesucht. Das Jahr 2020 wurde gewählt, da davon ausgegangen wird, dass der vorherige Zeitraum bereits durch die herangezogenen Übersichtsstudien abgedeckt ist. Für jede der Forschungsfragen wurde zunächst der Stand der Forschung aus den Übersichtsstudien abgeleitet und zusammengefasst. Folgende Suchsyntax wurde zur Identifikation weiterer Studien verwendet:

```
TS=(model-ba*)
AND (TS=(learning) OR TS=(education))
AND (TS=(Science) OR TS=(Biology) OR TS=(Physics) OR
TS=(Chemistry) OR TS=(Geo*))
NOT (TS=(higher education))
NOT (TS=(machine learning) OR (TS=(deep learning) OR
TS=(robot*)))
```

Diese Suchsyntax lieferte 132 Ergebnisse in Web of Science. Wir haben diese Auswahl mithilfe der von Web of Science angebotenen Filterfunktion eingegrenzt, um nur Artikel zu berücksichtigen, die sich mit Bildungsthemen befassen und um Modelle im Kontext von KI auszuschließen. Schließlich haben wir die Abstracts gesichtet, um nur Artikel auszuwählen, die sich mit der Primar- und Sekundarstufe I sowie der Lehrkräftebildung befassen. Dieser Auswahlprozess ergab letztlich 49 englischsprachige Artikel. Das Such- und Auswahlverfahren wurde in der deutschsprachigen Datenbank FIS Bildung wiederholt, wobei zwei deutschsprachige Artikel identifiziert wurden. Die Suche in den spanischsprachigen Datenbanken Enseñanza de las Ciencias und Eureka ergab 16 Artikel. Jeder Artikel wurde hinsichtlich seiner Relevanz für jede der Forschungsfragen bewertet. Nicht alle Artikel sind für alle Forschungsfragen relevant.

Ergebnisse

Frameworks zur Modellierkompetenz

Aus den von uns als Ausgangsbasis untersuchten Übersichtsstudien haben wir abgeleitet, dass wissenschaftliche Modelle (im Folgenden als „Modelle“ bezeichnet) als zielgerichtete abstrakte Repräsentationen von Phänomenen definiert werden, die als Werkzeuge zur Darstellung und Vermittlung wissenschaftlicher Ideen sowie als epistemische Werkzeuge zur Untersuchung und zum Verständnis von Phänomenen dienen (Gouvea & Passmore, 2017; Lobner et al., eingereicht). Wissenschaftliches Modellieren (im Folgenden als „Modellieren“ bezeichnet) ist der iterative Prozess des Konstruierens und Anwendens wissenschaftlicher Modelle. Modellbasiertes Lernen (MbL) bezieht sich auf die didaktischen Ansätze, die das Lernen mit Modellen und über Modelle sowie das Modellieren beinhalten. MbL ist ein mehrstufiger Prozess, in dem sich die Schüler*innen mit dem Konstruieren und Anwenden von Modellen beschäftigen (Louca & Zacharia, 2012; Margolin et al., 2022). Dieser Prozess umfasst auch die Auseinandersetzung mit Modellierpraktiken wie der Konstruktion, Bewertung, Überarbeitung, dem Vergleich und der Nutzung von Modellen zur Erklärung und Vorhersage von Phänomenen (Schwarz et al., 2009). Gouvea und Passmore (2017) betonten die aktive Rolle des Individuums bei der Entwicklung und Nutzung von Modellen und verschieben den Fokus von Modellen als bloße Abbilder der Realität („model of“) hin zu Modellen als Werkzeuge der Erkenntnisgewinnung („model for“). Dieser Ansatz spiegelt sich auch in den drei unterschiedlichen Leveln des Frameworks zum Metamodellierwissens von Upmeyer zu Belzen et al. (2019) wider. Hierbei beschreibt Level I eine naive Sicht auf Modelle als bloße Nachbildung des Phänomens, während Level ein differenzierteres differenzierterem Verständnis von Modellen widerspiegelt, bei dem Modelle als epistemische Werkzeuge zur Erklärung und Vorhersage von Phänomenen begriffen werden. Der naturwissenschaftliche Unterricht zielt darauf ab, die Modellierkompetenz der Schüler*innen zu fördern. Die Definitionen von Modellierkompetenz sind vielfältig, und in der naturwissenschaftsdidaktischen Literatur existieren verschiedene Frameworks zur

Modellierkompetenz. Im weiteren Sinne kann Modellierkompetenz definiert werden als “a system of the knowledge, skills, and abilities necessary to engage in the process of developing and using models for reasoning in science, including motivational dispositions to apply these capabilities for problem-solving in specific situations” (Göhner et al., 2022, S. 1357). Die meisten Definitionen und Frameworks der Modellierkompetenz konzentrieren sich auf drei Kerndimensionen: Metamodellierwissen, Modellierpraktiken und Modellierprodukt.

Metamodellierwissen bezieht sich auf epistemische Vorstellungen und das Verständnis von Modellen und dem Modellierprozess, d. h. das deklarative Wissen über Modelle und den Modellierprozess (Chan et al., 2025). Nicolaou und Constantinou (2014a) schlagen vor, dass das Metamodellierwissen unterteilt wird in Wissen über Modelle und Wissen über den Modellierprozess. Upmeyer zu Belzen et al. (2019) beschreiben in ihrem Framework fünf Aspekte des Wissens über Modelle: Eigenschaften von Modellen, alternative Modelle, Zweck von Modellen, Testen von Modellen und Ändern von Modellen. Sie beziehen auch nicht-kognitive Aspekte wie Motivation und Volition mit ein. Auch Chiu und Lin (2019) argumentieren, dass Modellierwissen neben metakognitivem Wissen über Modelle und den Modellierprozess auch ontologische, epistemologische und methodologische Aspekte enthalten sollte. Modellierpraktiken beziehen sich auf die beobachtbaren Modellieraktivitäten, die die Schüler*innen im Modellierprozess ausführen. Nicolaou und Constantinou (2014a) verstehen unter Modellierpraktiken Tätigkeiten wie das Erstellen, Verwenden, Vergleichen, Überarbeiten und Validieren von Modellen. Das Modellierprodukt bezieht sich auf die resultierenden Modellierartefakte aus dem Modellierprozess (Chan et al., 2025; Chiu & Lin, 2019; Göhner et al., 2022).

In ihrem Review, welches auch zum Ziel hat ein übergreifendes Framework der Modellierkompetenz zu etablieren, schlagen Lobner et al. (in Begutachtung) ein Framework für die Modellierkompetenz vor, welches aus vier Dimensionen besteht: (1) Dispositionen, zu denen Metamodellierwissen, fachspezifisches Wissen und nicht-kognitive Dispositionen gehören, (2) situationsspezifische Fähigkeiten, (3) Modellierpraktiken und (4) Modellierprodukt.

Es wird angenommen, dass alle Dimensionen der Modellierkompetenz positiv korrelieren (Chiu & Lin, 2019; Schwarz et al., 2009). Die wenigen empirischen Studien, die diese möglichen Korrelationen untersuchten, fanden jedoch nur schwache Belege für diese Behauptungen. Schwarz und White (2005) untersuchten das Metamodellierwissen bei Schüler*innen. Sie fanden heraus, dass ein höheres Metamodellierwissen dazu beitragen kann, dass Schüler*innen sich mehr auf den Modellierprozess einlassen können, insbesondere wenn er durch explizite reflektierende Diskussionen unterstützt wird. Sins et al. (2009) fanden eine positive Korrelation zwischen den Fähigkeiten der Schüler*innen zum tiefergehenden Modellieren und einem hohen Niveau an epistemischem Modellverständnis. Göhner et al. (2022) fanden in ihrer Studie mit angehenden Biologielehrkräften nur eine schwache Korrelation zwischen der Komplexität des Modellierprozesses und der Qualität der Modellierprodukte. Korrelation zwischen den anderen Modellierkompetenzdimensionen wurden nicht gefunden. Engelschalt et al. (2024) fanden eine moderate Korrelation zwischen

dem Wissen der Lehrkräfte über den iterativen Charakter des Modellierprozesses und dem Wissen über Modelle als Werkzeuge zur Vorhersage von Phänomenen. Aufgrund dieser uneinheitlichen Befunde besteht die Notwendigkeit, die Beziehungen zwischen den Dimensionen der Modellierkompetenz sowohl bei Lehrkräften als auch bei Schüler*innen weiter empirisch zu untersuchen.

Aus der aktuellen Literatur zu MbL ergeben sich darüber hinaus zusätzliche Aspekte, die beim MbL berücksichtigt werden sollten sowie weitere Forschungsdesiderate. Wie von Lobner et al. (eingereicht) angedeutet, weist die Modellierkompetenz fachspezifische Besonderheiten auf, die beim MbL berücksichtigt werden sollten. Gleichzeitig können auch fächerübergreifende Bezüge innerhalb der Naturwissenschaften sinnvoll sein. Es sollte auch beachtet werden, dass in den verschiedenen Frameworks unterschiedliche Begriffe wie bspw. Fertigkeiten, Fähigkeiten und Praktiken verwendet werden, um die Modellierkompetenz zu beschreiben. Diese Begriffe decken in der Regel die Dimensionen der Modellierkompetenz, können aber auch zusätzliche Aspekte beinhalten, die zu berücksichtigen sind. Empirische Studien zur Modellierkompetenz bei Kindern im frühen Kindesalter und bei Grundschüler*innen sind in der Literatur unterrepräsentiert, sodass hier weiterer Forschungsbedarf ersichtlich wird.

Von den 49 englischsprachigen Artikeln, die in den letzten 5 Jahre veröffentlicht wurden, sind 23 für die Beantwortung der ersten Forschungsfrage relevant, da sie Frameworks zur Modellierkompetenz thematisieren.

Das in den Artikeln am häufigsten vorkommende Framework, welches in 11 der 23 Artikel verwendet wurde (z. B. Lacy et al., 2022; Peretz et al., 2023), ist das Framework der Modellierpraxis aus dem „Framework for K-12 Science Education“ (NGSS, 2012). Das Framework für Modellierpraxis versteht das Modellieren als eine der zentralen naturwissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Praktiken, die Schüler*innen entwickeln sollten. Dabei umfasst es sowohl das Wissen über Modelle als auch die Fähigkeiten, Modelle zu erstellen und zu nutzen, um Phänomene zu verstehen.

Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auch in den spanischsprachigen Artikeln: Von den 16 analysierten Artikeln stützen sich 7 explizit auf Modellierpraktiken als ihren wichtigsten theoretischen oder didaktischen Rahmen (z. B. Jiménez-Liso et al., 2021; Oliva et al., 2021). Damit ist der Anteil in der spanischsprachigen Literatur (7 von 16) mit dem der englischsprachigen Literatur (11 von 23) gut vergleichbar. Diese Übereinstimmung deutet darauf hin, dass Modellierpraktiken auch in der spanischsprachigen naturwissenschaftlichen Bildungsforschung zu einem zentralen Bezugspunkt geworden sind, sowohl für die Strukturierung von Unterrichtssequenzen als auch für die Analyse der Modellierprozesse bei Schüler*innen.

Das am zweithäufigsten verwendete Framework wurde in 7 der 23 analysierten Artikel genutzt (z. B. Campbell et al., 2025; Pedrera et al., 2025). Dieses Framework, welches ursprünglich von Windschitl et al. (2008) entwickelt wurde, versteht das naturwissenschaftliche Lernen als ein Zusammenspiel aus forschenden Aktivitäten und fachlichen Diskursen, was bei den Schüler*innen zu einem tiefergehendem Lernen führen

soll. Dies geschieht in einem zyklischen Prozess des Konstruierens, Testens, Überarbeitens und Anwendens von Modellen, um evidenzbasierte Erklärungen für Phänomene der realen Welt zu entwickeln. Basierend auf diesem Framework werden die Ideen der Schüler*innen in Form von Modellen dargestellt, die überprüfbar, änderbar, erklärend, spekulativ und generativ sind. In der spanischsprachigen Literatur finden sich 3 von 16 Studien, die sich explizit mit diesem modellbasierten Forschungsansatz befassen, wie beispielsweise Guimarães und Peticarrari (2025).

Modellierungskompetenz wurde in fünf der 23 Beiträge thematisiert. Allerdings bezogen sich nur zwei dieser Beiträge (z. B. Garido & Couso, 2025) auf das Modellierkompetenz-Framework von Upmeyer zu Belzen et al. (2019). Das Framework umfasst Aspekte des Metamodellierwissens, d. h. Wissen über die Eigenschaften und den Zweck wissenschaftlicher Modelle und des Modellierens sowie die Fähigkeiten, sich mit Modellierpraktiken auseinanderzusetzen und ein geeignetes Modellprodukt zu erstellen. Die anderen drei Artikel erwähnten die Modellierkompetenz in einer allgemeineren und unspezifischeren Weise. Im Gegensatz dazu greifen in der spanischsprachigen Literatur keine der analysierten Artikel explizit auf dieses Modellierkompetenz-Framework zurück. Obwohl einige Artikel Modellierfähigkeiten oder die Verwendung von Modellen thematisieren, ordnet keiner der Artikel die Modellierkompetenz systematisch nach Metamodellierwissen, Modellpraktiken strukturiert keine ihre Analysen nach Metamodellierwissen, Modellierpraktiken oder Modellierprodukte im Sinne dieses Frameworks. Dieses Fehlen deutet darauf hin, dass im spanischsprachigen Forschungskontext noch keine ausgeprägte Tradition besteht, Modellierkompetenzen als eigenständiges theoretisches Konstrukt zu konzeptualisieren, im Gegensatz zu der etablierteren Verwendung in der internationalen (vorwiegend englisch- und deutschsprachigen) Literatur.

MbL wurde in vier der 23 englischsprachigen Artikel thematisiert (z. B. Erumit & Yuksel, 2023), wobei auch soziowissenschaftliches (*socioscientific*) modellbasiertes Lernen (SIMBL, z. B. Durak & Topçu, 2025) mit einbezogen wurde. Auch in vier der 16 spanischsprachigen Artikel wurde MbL thematisiert (z. B. Domènech-Casal, 2020). Modellbasierte Erklärungen wurden in drei der 23 Artikel verwendet (z. B. Lindgren et al., 2021) und modellbasiertes Denken wurde in zwei Artikeln erwähnt (z. B. Lacy et al., 2022),

Andere Frameworks, die in der analysierten Literatur nur einmal thematisiert wurden, umfassten Frameworks zu mentalen Modellen, zur Erkenntnistheorie von Modellen, zum konzeptuellen Modellieren, zu Modellierfähigkeiten, zum modellbasierten Unterricht und zur Modellieraktivität.

In der analysierten Literatur wurden Modelle typischerweise als Darstellungen realer Phänomene und natürlicher Systeme definiert, die relevante Komponenten des untersuchten Phänomens, deren Eigenschaften und deren Wechselwirkungen umfassen. In den meisten der analysierten Artikel werden Modelle verwendet, um die Mechanismen und kausalen Zusammenhänge im System zu beschreiben und zu erklären sowie Vorhersagen zu treffen. Mentale Modelle werden als Modelle definiert, die als Ergebnis kognitiver Prozesse im Kopf des einzelnen Individuums entstehen. Modellieren wird in der analysierten Literatur im

Allgemeinen als iterativer Prozess der Konstruktion, Bewertung, des Vergleichs, der Überarbeitung und der Nutzung von Modellen zur Erklärung und Vorhersage von Phänomenen verstanden. Im didaktischen Kontext wird Modellieren als eine Tätigkeit angesehen, um naturwissenschaftliches Wissen zu erlangen.

Förderbedarf bei Schüler*innen im Bereich des Modellierens

In den Übersichtsstudien, die wir als Grundlage herangezogen haben, basieren didaktische Ansätze zum Modellieren häufig darauf, Schüler*innen in tatsächliche Modellierprozesse einzubeziehen, d. h. Modelle zu konstruieren, zu erforschen und zu überarbeiten. Viele Autor*innen haben sich damit befasst, wie solche Modellierpraktiken im Unterricht eingeführt werden können. So setzen Windschitl et al. (2008) die Modellierpraktiken in Bezug zu wissenschaftlichem Denken und damit verbundenen fachlichen Diskursen, die unter den Aspekten „Was wissen wir bereits?“, „Hypothesen aufstellen“, „Nach Belegen suchen“ und „Ein Argument konstruieren“ zusammengefasst werden. Bielik et al. (2022) definieren mehrere Aspekte, die sich stärker auf die Konstruktion des Modells selbst konzentrieren: Grenzen definieren, Komponenten und Grenzen bestimmen, Belege und Argumentation nutzen sowie das Verhalten des Modells interpretieren. Vor dem Hintergrund, Lehrkräfte bei der Planung ihres Unterrichts zu unterstützen, stützen Campbell et al. (2025) ihr Instrument zur Unterrichtsplanung auf einen ähnlichen Entwurf des Modellierprozesses. Ein Versuch, dieses Instrument und viele weitere Ansätze in einem Framework zusammenzufassen, ist der „Instruction Performance Modelling (IPM)“-Zyklus (Garrido & Couso, 2025). Ein wichtiges Merkmal dieses Zyklus ist, dass er die Modellieraktivitäten der Schüler*innen und die damit verbundenen Unterrichtsphasen mit unterschiedlichen Instruktionen voneinander trennt (siehe Abbildung 1).

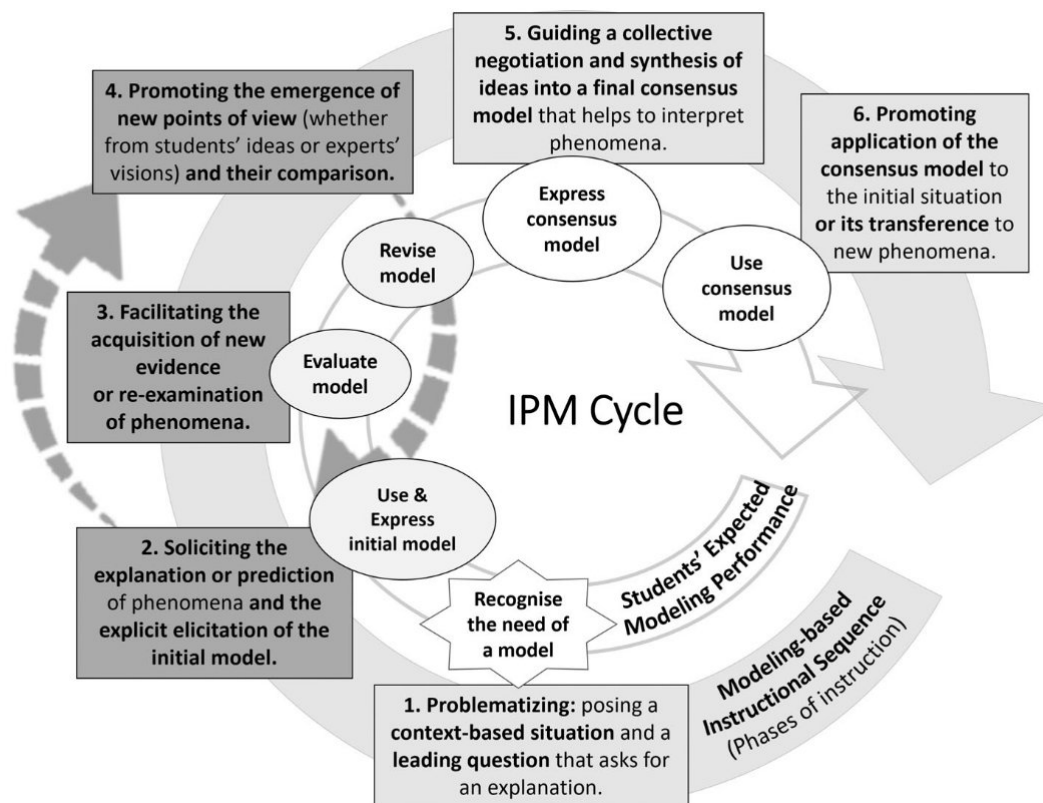


Abbildung 1 Der IPM-Zyklus nach Garrido und Couso (Garrido & Couso, 2025)

Betrachtet man den Zyklus, so lässt sich diese Trennung tatsächlich erkennen, auch wenn die Unterrichtsphasen den Modellierphasen nach wie vor weitgehend nachempfunden sind. Im Zyklus lassen sich drei Hauptphasen unterscheiden, die wir als „Orientierung“, „Modellierung“ und „Anwendung“ bezeichnen können und die im IPM-Zyklus als Phasen 1, 2–4 und 5–6 dargestellt sind. Diese Phasen beschreiben den Modellierprozess auf einer abstrakten Ebene, liefern jedoch keine Einblicke in die didaktischen oder pädagogischen Maßnahmen zur Unterstützung dieser Modellierprozessphasen.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Durchführung des Modellierprozesses durch die Schüler*innen nicht automatisch bedeutet, dass sie (Meta-)Modellierwissen über diesen Prozess oder über die Rolle von Modellen in der Wissenschaft aufbauen. Die Folge ist, dass wir zusätzlich zur Unterstützung des Modellierprozesses auch ein abstrakteres Denken *über* Modelle und Modellieren fördern müssen. Daher ist es sinnvoll, dass sich die Schüler*innen beim Erlernen des Modellierens oder beim Lernen über Modelle und Modellieren, vor, während und nach dem Modellierprozess mit unterschiedlichen Fragen befassen. Die folgende Tabelle enthält exemplarische Fragen, die sich auf einzelne Phasen des Modellierprozesses beziehen und den Aufbau von Metamodellierwissen fördern können.

Tabelle 1: Fragen zum Modellierprozess, zu Modellen und zum Metamodellierwissen

<i>Modellierphase</i>	<i>Fragen zu Modellen und Modellieren</i>	<i>Fragen zum Metamodellierwissen</i>
<i>Auseinandersetzung mit dem Problem</i>	Was ist das Problem? Was wissen wir bereits?	Eignet es sich für das Modellieren? Welche Annahmen können formuliert werden? Wann sind wir mit dem Modell zufrieden? Was ist der Zweck des Modells?
<i>Konstruktion des Modells</i>	Was sind die relevanten Elemente, Variablen und Parameter? In welcher Beziehung stehen sie zueinander?	Welche Aspekte müssen modelliert werden und welche nicht? Inwiefern spiegelt dieses Modell die Realität wider?
<i>Testung des Modells</i>	Wie vergleichen wir das Modell mit der Realität?	Was macht in diesem Fall ein gutes Modell aus? Welche Kriterien haben wir für unser Modell?
<i>Überarbeitung des Modells</i>	Welche Änderungen sind am Modell erforderlich? Wie werden die Änderungen umgesetzt?	Welche Aspekte des Modells müssen überarbeitet werden und warum?
<i>Anwendung des Modells</i>	Was sagt das Modell über neue Situationen voraus? Wie müssen die Variablen/Parameter eingestellt werden, um aussagekräftige Ergebnisse des Modells zu erhalten?	Was sind die Grenzen des Modells? Kann ich den Vorhersagen des Modells auf der Grundlage der Modellannahmen vertrauen?
<i>Reflexion über das Modell</i>	Dient das Modell unserem Zweck?	Gibt es einen Konsens über das Modell? Sind andere Modelle möglich? Was wären deren Vor- und Nachteile? Reicht ein Modell aus?
<i>Reflexion über den Modellierprozess</i>	Haben wir die notwendigen Schritte unternommen, um ein zufriedenstellendes Modell zu erstellen und zu bewerten?	Was spricht für einen Modellierprozess?

Die oben genannten Fragen bieten Möglichkeiten, um den Modellierprozess in unterschiedlichen Phasen zu unterstützen. Die daraus resultierenden Interventionen können aus der Lernumgebung selbst stammen oder von Lehrkräften geleitet werden. Solche Scaffolding-Ansätze finden sich auch in Literatur zum forschenden Lernen wie beispielsweise in den Scaffolding-Frameworks von Lazonder und Quintana (Lazonder & Harmsen, 2016; Quintana et al., 2004).

Zu den weiteren wichtigen Erkenntnissen, die sich aus der analysierten Literatur ableiten lassen, zählen *das bifokale Modellieren* (Blikstein, 2014), d. h. die direkte Verknüpfung von Modellen mit Experimenten; die Progression innerhalb des Modellierens, d. h. beginnend beim Zeichnen von Modellen bis hin zu qualitativen und quantitativen Modellieransätzen; die Bedeutung hochwertiger Darstellungen und Visualisierungen sowie das Arbeiten sowohl mit greifbaren haptischen Materialien als auch mit technischen Tools, wie bspw. RFID-Tags, zum Konstruieren von Modellen.

Schließlich haben wir Informationen, sofern vorhanden, zur Wirksamkeit der didaktischen Intervention gesammelt. In den seit 2020 untersuchten Artikeln fanden wir lediglich Unterstützungsmöglichkeiten für den Modellierprozess, also das Konstruieren von Modellen. Weder in der englisch- noch in der spanischsprachigen Literatur fanden wir explizite didaktische Interventionen zur Förderung des logischen Denkens im Bereich des Metamodellierwissens. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Studien in den Artikeln nicht zur Entwicklung des Metamodellierwissens beitragen. Vielmehr ist davon auszugehen, dass das Durchführen von Modellieraktivitäten für die Entwicklung des Metamodellierwissens unerlässlich ist. Jedoch wurden in den Artikeln keine expliziten Interventionen diesbezüglich erwähnt.

Die Aktivitäten zur Modellkonstruktion konzentrieren sich auf verschiedene Aspekte des Modellierprozesses. *Die Auseinandersetzung mit dem Problem* wurde bspw. dadurch unterstützt, dass die Schüler*innen Zeichnungen anfertigten (Lindgren et al., 2021; Liu, 2021; Samarapungavan et al., 2023) oder andere Visualisierungen wie Animationen (Lin & Wu, 2021) erstellten. Für *die Konstruktion des Modells* nennen Arik und Topçu (2022) explizite Instruktionen und Strukturierungshilfen, die die Schüler*innen unterstützen sollen. Dazu zählen bspw. die Aufzählung einzelner Schritte oder die Vorgabe bestimmter Strukturen für die Modellkonstruktion.

Zur *Testung des Modells* wurden von Bhattacharya et al. (2021) Leitfragen eingesetzt, die Schüler*innen bei der Interpretation der aus dem Modell abgeleiteten Daten unterstützen sollen. Ein weiterer Ansatz ist der Einsatz von realen und simulierten Experimenten, um die Schüler*innen darin zu unterstützen, ihre Vorhersagen zu überprüfen und mit Beobachtungen aus den Experimenten zu vergleichen (Bozzo et al., 2022). Dieser Ansatz orientiert sich an dem von Blikstein (2014) eingeführten Konzept des *bifokalen Modellierens*. Die *Überarbeitung des Modells* wurde in zwei Studien explizit adressiert. Bielik et al. (2022) nutzten hierfür Videos und Experimente als Impulse, um das Modell über seinen aktuellen Stand hinaus weiterzuentwickeln. Lucas et al. (2022) stellten fest, dass Schüler*innen, die ihre Modelle mittels entsprechender Impulse überarbeiteten, im Posttest bessere Leistungen erzielten. Der spanischsprachige Korpus weist hier ein deutliches Ungleichgewicht auf: Alle Studien thematisieren *die Auseinandersetzung mit dem Problem* und *die Konstruktion des Modells*, während nur wenige Studien systematische Phasen des *Testens und Überarbeitens von Modellen* beinhalten.

In einigen Artikeln bezogen sich die Unterstützungsangebote nicht auf einzelnen Phasen des Modellierprozesses, sondern auf den gesamten Prozess als solchen. Zwei Artikel stützen sich

hierbei auf den IPM-Zyklus (siehe Abbildung 1) und stellten fest, dass die Berücksichtigung dieses Zyklus förderlich ist, um Interesse, Konzentration und Zufriedenheit bei den Schüler*innen zu steigern (Jimenez-Liso et al., 2022; Pedrera et al., 2025).

Ein weiterer Ansatz besteht darin, den Modellierprozess über Storylines und Storytelling zu strukturieren. Lindgren et al. (2021) ließen Schüler*innen eine Story zu der Frage „Warum ist ein Teich im Sommer grün?“ entwickeln und überführten diese schrittweise in eine modellbasierte Erklärung des Phänomens.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die in den Artikeln erwähnten Studien entweder den gesamten Modellierprozess unterstützen oder gezielt einzelne Phasen adressierten. Es gibt nicht viele empirische Belege für die Effekte dieser Maßnahmen, jedoch berichten mehrere Studien insgesamt über positive Auswirkungen auf das Modellieren.

Die zentralen Erkenntnisse, die wir aus den verschiedenen Ansätzen gewinnen können, sind demnach:

- Die Verwendung von visuellen und/oder physischen Darstellungen, wie Zeichnungen, manipulierbare Objekte oder selbst erstellte Animationen, wird insbesondere in explorativen Phasen des Modellierprozesses häufig genutzt.
- Beim digitalen Modellieren ist das Erlernen und Anwenden der jeweiligen Darstellungs- und Strukturierungsregeln zentral, die spezifischer Unterstützung bedürfen. Eine mögliche Unterstützung bieten qualitative Modellierungsansätze, die die Erstellung von Modellen ohne das Schreiben von Code oder Gleichungen ermöglichen.
- Was bislang weitgehend fehlt, ist eine explizite Förderung des Metamodellierwissens, d. h. das Reflektieren über die Natur und Eigenschaften von Modellen und ihre Rolle in der Naturwissenschaft und darüber hinaus.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass sich das vorliegende Review auf didaktische Interventionen bezieht, die in die Lernumgebung integriert sind. Das bedeutet, dass spontane Interventionen der Lehrkraft nicht berücksichtigt wurden.

Oh und Oh (2011) haben die internationale Literatur ausgewertet, um zu untersuchen, welches Wissen Lehrkräfte über naturwissenschaftliche Modelle benötigen (d. h. inhaltliches Wissen über Modelle und Modellieren). Sie schlagen vor, dass Lehrkräfte verstehen sollten, was ein Modell ist, den Zweck und die Anwendungen des Modellierens, welche Vielfalt an Modelle existieren und unter welchen Umständen Modelle verändert werden. In Bezug auf die didaktische Unterrichtsplanung betonen die Autoren zudem, dass die Lehrkräfte nicht nur einen inhaltsbezogenen Ansatz verfolgen sollten, der sich auf die Vermittlung von Inhalten zum Modellwissen konzentriert. Sie sollten ebenfalls einen produktionsorientierten Ansatz in ihre Planung einbeziehen, bei denen Schüler*innen aktiv Modelle zur Erklärung naturwissenschaftlicher Phänomene nutzen. Sie argumentieren zudem, dass Lehrkräfte fünf Formen von modellierbezogener Didaktik kennen sollten: exploratives, expressives, experimentelles (oder forschendes), evaluatives und zyklisches Modellieren. Forschungsarbeiten von Campbell et al. (2015) haben gezeigt, dass diese fünf Formen tatsächlich häufig in empirischen Studien zum Modellieren vorkommen.

Themenbereiche

Die analysierten Artikel beschreiben MbL im naturwissenschaftlichen Unterricht. Die Fächer Physik und Biologie werden in den Artikeln am häufigsten erwähnt, während Chemie sowie Geo- und Umweltwissenschaften unterrepräsentiert sind. In der Physik umfassen die Unterrichtsinhalte thematisch Bewegung und Beschleunigung, Kraft und Bewegung, Diffusion, die Temperaturregulierung in Innenräumen sowie astronomische Themen wie Sonnensysteme und andere astronomische Konzepte. Artikel im Bereich der Biologie befassen sich mit Pflanzenwachstum, Zellstrukturen, marinen und fluvialen Ökosystemen. Beispiele aus dem Fach Chemie behandeln Themenbereiche wie Molekülstrukturen und Chromatographie, chemische Reaktionen sowie chemische Gleichgewichte. Artikel aus den Geo- und Umweltwissenschaften thematisieren Plattentektonik, Vulkane, fluviale Ökosysteme, die globale Erwärmung, den Wasserkreislauf in Verbindung mit Filtrationsaktivitäten sowie die Entwicklung von Modellen zur Wasserqualität. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die in den ausgewählten Artikeln behandelten Themen sowie die jeweiligen ungefähren Altersgruppen, für die die jeweilige Modellieraktivität konzipiert wurde. Zudem enthält die Tabelle die sekundäre Verweise der analysierten Artikel.

Tabelle 2: Themenbereiche, die in den analysierten Artikeln (einschließlich Sekundärreferenzen) behandelt werden.

Fach	Themenbereich	Altersgruppe	Referenz
<i>Physik</i>	Bewegung und Beschleunigung	11–12; 16–17	(Louca et al., 2011; Sins et al., 2009)
	Kraft und Bewegung	12–13	(Schwarz & White, 2005)
	Diffusion	11–12	(Louca et al., 2011)
	Temperaturregulierung in Innenräumen	16–17	(Löhner et al., 2003)
	Sonnensysteme und astronomische Konzepte	18–22	(Barab et al., 2000; Hansen et al., 2004)
<i>Biologie</i>	Pflanzenwachstum	14	(Ergazaki et al., 2007)
	Zellstrukturen	4–5	(Cruz-Guzmán et al., 2020)
	marine Ökosysteme	10–11	(Papaevripidou et al., 2007)
	fluviale Ökosysteme	14–15; 21–23	(Crawford & Cullin, 2005; Stratford et al., 1998)
<i>Chemie</i>	Molekülstrukturen & Chromatographie	21–23	(Aalbergsjø & Sollid, 2021)
	Chemische Reaktionen	17–18	(Dori & Kaberman, 2012)
	Chemisches Gleichgewicht	14–15	(Maia & Justi, 2009)
<i>Geo- und Umweltwissenschaften</i>	Plattentektonik	12–17	(Gobert, 2000)
	Vulkane	12–13	(Pluta et al., 2011)
	fluviale Ökosysteme	14–15	(Stratford et al., 1998)
	Globale Erwärmung	16–17	(van Borkulo et al., 2012)
	Modelle zur Wasserqualität	22–25	(Zhang et al., 2006)

Im Fach Biologie konzentriert sich das Modellieren auf Systeme wie bspw. das Verdauungssystem oder Ökosysteme und auf Aspekte der Biodiversität. Die Lerneinheiten im Fach Physik befassen sich vor allem mit Phänomenen, die nicht direkt beobachtbar sind, wie Energie, Schall und Elektrostatik. Im Chemieunterricht stehen insbesondere Erklärungen auf Teilchenebene im Mittelpunkt, z. B. zum Verhalten von Gasen sowie zu Wärme und Druck. Im Geographieunterricht sowie in den Umweltwissenschaften sollen Schüler*innen ein Verständnis für den Klimawandel, die Wasserqualität sowie die Auswirkungen des menschlichen Handelns auf Ökosysteme entwickeln.

Tabelle 3 bietet einen Überblick über die in den analysierten Artikeln behandelten Themen. Im Vergleich zu Tabelle 2 konnten hierbei mehr Informationen über den Kontext berücksichtigt werden, da zusätzlich die referenzierten Originalartikeln überprüft wurden.

Tabelle 3: Überblick über die Fächer, Themen, Altersgruppen und Kontexte, die in den analysierten Artikeln behandelt wurden.

Fach	Thema	Altersgruppe	Kontext	Referenz
<i>Biologie</i>	Verdauungssystem	Mittelstufe	Modellieren mit Hilfe von computergestütztem Denken zum Verständnis komplexer Organinteraktionen. Entspricht dem Schwerpunkt des türkischen Lehrplans auf Ernährungssystemen.	(Arik & Topçu, 2022)
	Ökosysteme & Biodiversität	6. bis 8.	S S I - b a s i e r t e Unterrichtseinheit mit Schwerpunkt auf einem lokalen ökologischen Problem („weißer Schmetterling“); Einsatz von MBL im türkischen naturwissenschaftlichen Lehrplan.	(Durak & Topçu, 2023)
	Wasserökologie, Ökosysteme	5. bis 6.	An den NGSS angepasste Storyline-Einheit zu Algenblüten; langfristige ökologische Untersuchungen, die in den USA durchgeführt wurden.	(Lindgren et al., 2021)
	Herz-Kreislauf-System	Alter 5–6	Die nach dem mexikanischen Vorschulprogramm konzipierte Unterrichtseinheit behandelt Venen, Herzfunktion, Blutkreislauf und Thermoregulation.	(De Alba Villaseñor & Ramos de Robles, 2020)

Fach	Thema	Altersgruppe	Kontext	Referenz
	Zellen, Gewebe und Mikroorganismen	Alter 10–13	Studie an chilenischen öffentlichen Schulen mit Schwerpunkt auf der Visualisierung zellulärer Strukturen, Mikroskopie und der Darstellung mikroskopischer biologischer Phänomene	(Rodríguez Mora & Blanco López, 2020)
	Wasserökologie und Ökosysteme	7. Klasse	Umsetzung einer Unterrichtseinheit im realen Klassenzimmer, die ein lokales Umweltproblem behandelt (Massensterben von Fischen und Algen durch die Einleitung von Salzlake)	(Jiménez-Liso et al., 2021)
	Immunsystem (Antigene, Gedächtniszellen usw.)	Alter: 11–16	Durchgeführt an einer städtischen Schule in Praia Grande (Brasilien) während der COVID-19-Pandemie, zur Erforschung von Konzepten des Immunsystems und der Impfung	(Guimarães Siles & Peticarrari, 2025)
	Ökosystemdynamik	10. Klasse	Diese Studie nutzt eine Tabellenkalkulationsumgebung (Calc/Excel), um Computermodelle der Ökosystemdynamik zu erstellen und iterativ zu verfeinern	(Domènech-Casal, 2020)
	Elektrostatik	Alter 9–10	Die Rolle von praktischen Experimenten und PhET-Simulationen bei der Entwicklung eines Modells und dessen Bezug zur realen physikalischen Welt. Eine Physik-Lerneinheit für die Grundschule, die auf den italienischen nationalen Lehrplan für Naturwissenschaften abgestimmt ist.	(Bozzo et al., 2022)
Physik	Schall	6. Klasse	Vergleich von modellbasiertem Forschen (modelling-based inquiry [MBI]) und argumentationsgestütztem MBI, umgesetzt an türkischen staatlichen Schulen.	(Geçgil & Akçay, 2024)

Fach	Thema	Altersgruppe	Kontext	Referenz
Chemie	Energieformen, -übertragung und -umwandlung	4. und 5. Klasse	Entwicklung und Bewertung der an den NGSS angepassten Unterrichtseinheit „Focus on Energy“ unter Verwendung von MBI. Getestet in US-amerikanischen Grundschulen der oberen Jahrgangsstufen.	(Geçgil & Akçay, 2024)
	Teilchenmodell der Materie	Vorschule	Untersuchung, wie technologiegestütztes MBL die Entwicklung von Modellen der Materie bei Kindern in den USA beeinflusst.	(Samarapungavan et al., 2023)
	Messung und Unsicherheit	5. Klasse	Eine Unterrichtseinheit im chinesischen Grundschulunterricht in Naturwissenschaften, die Messunsicherheit, die Interpretation von Ergebnissen und das logische Denken im realen Kontext in den Vordergrund stellt.	(Tang et al., 2024)
	Auftrieb	1. Klasse	Forschungsbasierte Aktivitäten unter Verwendung von Vorhersage-Beobachtung-Erklärung-Routinen und angeleiteten Fragen zur Erforschung der Ursachen des Auftriebs.	(García-Rodeja et al., 2023)
	Lösung (Gas in Flüssigkeit)	Alter 13–14	Eine Abfolge von 14 Aktivitäten im Zusammenhang mit der kinetischen Molekulartheorie; umgesetzt im naturwissenschaftlichen Unterricht der spanischen Sekundarstufe.	(Cañero-Arias et al., 2024)
	Auftrieb, Wärmekapazität, Flüssigkeitsdruck	8. und 9.	Die Wirkung von Virtual-Lab-gestütztem MBI. Die Unterrichtseinheiten wurden gemeinsam mit Lehrkräften entwickelt und im taiwanesischen naturwissenschaftlichen	(Chang et al., 2024)

<i>Fach</i>	<i>Thema</i>	<i>Altersgruppe</i>	<i>Kontext</i>	<i>Referenz</i>
			Lehrplan der Mittelstufe eingesetzt.	
	Säuren und Basen	Alter 13–14	MBI-Unterrichtsablauf, der darauf abzielt, das Engagement der Schüler*innen zu fördern. Durchgeführt an ländlichen spanischen Schulen, an denen Säure-Base-Chemie auf dieser Stufe selten unterrichtet wird.	(Jimenez-Liso et al., 2022)
	Kinetische Molekulartheorie, Diffusion, Dichte, Gasgesetze	7. bis 11.	Vergleich von MbL mit akustischen Modellen für blinde Schüler und visuellen Modellen für sehende Schüler; umgesetzt in Israel.	(Peleg et al., 2024)
	Gärung	10. Klasse	Untersuchung von Fermentation und chemischen Reaktionen in Spanien anhand eines realen Kontexts zu Ernährung und Gesundheit.	Muñoz-Campos et al., 2020
	Lösungen und Trennverfahren	9. und 10. Klasse	Unterrichtseinheit für die Sekundarstufe in Spanien, die den Trinkwasserkonsum (Leitungswasser vs. Wasser in Flaschen), die chemische Charakterisierung von Wasser, Reinheit, Trennverfahren, gesundheitliche Auswirkungen und Umweltprobleme im Zusammenhang mit dem massiven Konsum von Wasser in Flaschen untersucht.	(Rodríguez Mora & Blanco López, 2020)
<i>Geographie</i>	Globaler Klimawandel, Temperatur der Erde	9. Klasse	Vergleich von modellbasierten und nicht modellbasierten Untersuchungen des Erdklimas. Für das Modellieren wurde EzGCM-Klimasimulationen verwendet. Schwerpunkt auf Evidenz, systemischem Denken und menschlichen Einflüssen.	(Bhattacharya et al., 2021)
	Schwankungen	8. und 9.	Gedankenexperiment,	(Oliva et al.,

<i>Fach</i>	<i>Thema</i>	<i>Altersgruppe</i>	<i>Kontext</i>	<i>Referenz</i>
<i>Umweltwissenschaften (fächerübergreifend)</i>	der Erdmasse und chemische Umwandlungen	Klasse	durchgeführt an zweisprachigen und spanischsprachigen Schulen, bei dem Chemie und Biologie im Rahmen der Geowissenschaften integriert wurden, um Schwankungen der Erdmasse und chemische Umwandlungen zu untersuchen	(2021)
	Geologie, Weltraum, Luftverschmutzung, menschliche Gesundheit	Klassenstufen 1–6	Lehrplananalyse des spanischen Grundschulwesens mit Schwerpunkt auf der Marginalisierung geowissenschaftlicher Inhalte durch deren Einordnung in die Sozialwissenschaften statt in die Naturwissenschaften	(Achurra et al., 2022)
	Externe Geodynamik & geologisches Erbe	9. Klasse	Unterrichtssequenz zu wissenschaftlichen Methoden und gesellschaftswissenschaftlichen Fragen im Zusammenhang mit dem geologischen Erbe Spaniens, mit Schwerpunkt auf externer Geodynamik und Landschaftsbildung	(Paz Otero & Puig, 2020)
	Treibhauseffekt, ökologischer Fußabdruck, Energie, fossile Brennstoffe, Entwaldung	8. Klasse	Eine Unterrichtseinheit, die SSI, wissenschaftliches Modellieren und Systemdenken kombiniert, basierend auf dem SIMBL-Rahmenwerk. Durchgeführt in der Türkei.	(Durak & Topcu, 2023)
	Wasserqualität und -reinigung	8.	SIMBL-basierter Unterricht mit Schwerpunkt auf evidenzbasiertem Denken im naturwissenschaftlichen Unterricht der Mittelstufe in China.	(Jia & Ren, 2025)

Aus Tabelle 2 und Tabelle 3 wird deutlich, dass MbL vor allem bei Unterrichtsthemen eingesetzt wird, die dynamische und häufig nicht direkt beobachtbare Phänomene betreffen und deren Verständnis die Darstellung von Wechselwirkungen, Mechanismen und Veränderungen im Zeitverlauf erfordert. Darüber hinaus spielen sozialwissenschaftliche und

gesellschaftlich relevante Themen eine wichtige Rolle, wobei Lernprozesse in reale Kontexte eingebettet werden, die von den Schüler*innen verlangen, Belege zu bewerten, verschiedene Perspektiven zu berücksichtigen und über Wechselwirkungen zwischen Mensch und Umwelt zu reflektieren. Insgesamt zeigen die analysierten Artikel, dass MbL vor allem bei Themen angewendet wird, bei denen systemisches Denken, kausales Verständnis und die Auseinandersetzung mit gesellschaftlichen Themen für die erforschten Phänomene von zentraler Bedeutung sind.

Tools

Die Forschung zum MbL zeigt eine Vielfalt an Tools und didaktischen Ansätzen, die zur Entwicklung der Modellierkompetenz von Schüler*innen eingesetzt werden. Eine wesentliche Unterscheidung besteht zwischen nicht-computerbasierten und computerbasierten Tools. Für beide Bereiche wurde auf der Grundlage der Übersichtsstudien jeweils eine Typologie entwickelt, anhand derer die Nutzung und Anwendung der in den Artikeln identifizierten Tools analysiert wurde.

Nicht-computerbasierte Modelliertools

Chan et al. (2025) und Margolin et al. (2022) beschreiben mehrere nicht-computerbasierte Modelliertools, die in der Ausbildung von Naturwissenschaftslehrkräften eingesetzt werden. Physische Modelle aus Lebensmitteln, wie bspw. Nudeln, oder Modelle, die mithilfe von Haushaltsgeräten, wie bspw. Ventilatoren, konstruiert wurden, wurden verwendet, um Molekülstrukturen und chromatographische Prozesse darzustellen (Aalbergsjø & Sollid, 2021; Cruz-Guzmán et al., 2020). Zeichnungen, Diagramme und Konzeptkarten dienen der Externalisierung und Überarbeitung mentaler Modelle (Cruz-Guzmán et al., 2023; Nelson & Davis, 2012; Torres & Vasconcelos, 2016, 2021; Valanides & Angeli, 2008). Darüber hinaus wurden Materialien wie Schokolinsen oder Gummibärchen eingesetzt, um bspw. die Zellstruktur nachzuempfinden. Solche Ansätze unterstützen sowohl die kritische Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Modelltypen sowie den spielerischen Explorationsprozess (Everett et al., 2009). Praktische Aktivitäten, einfache Experimente sowie sogenannte Black-Box-Experimente mit Seilen und Schläuchen wurden zur Bewertung von Modellen eingesetzt (Aalbergsjø & Sollid, 2021; Crawford & Cullin, 2005; Jimenez-Liso et al., 2022). Ergänzend kommen körperliche Aktivitäten und Rollenspiele zum Einsatz (Enyedy et al., 2012; Schwarz et al., 2022), ebenso wie der Einsatz von Augmented Reality und taktile erfahrbare Rückmeldungen.

In den spanischsprachigen Artikeln finden wir eine ähnliche Auswahl an nicht-computergestützten Modelliertools. Zeichnungen und Diagramme werden häufig verwendet, um die Schüler*innenerklärungen zu veranschaulichen und weiterzuentwickeln (Jiménez-Liso et al., 2021; Muñoz Campos et al., 2020; Paz Otero & Puig, 2020). Auch praktische Laboraktivitäten kommen häufig vor und unterstützen die Untersuchung von Phänomenen wie dem Auftrieb, zellulären Prozessen oder chemischen Reaktionen und Gegebenheiten (García-Rodeja et al., 2023; Grimalt-Álvaro et al., 2021; Muñoz Campos et al., 2020; Rodríguez

Mora & Blanco López, 2020). Viele Artikel stützen sich zusätzlich oder ausschließlich auf handschriftliche Entwürfe bei der Konstruktion und Überarbeitung von Modellen (García-Rodeja et al., 2023; Guimarães Siles & Perticarrari, 2025; Muñoz Campos et al., 2020; Oliva et al., 2021; Rodríguez Mora & Blanco López, 2020). Im Gegensatz zur englischsprachigen Literatur fanden sich in der spanischen Literatur keine Beispiele für Black-Box-Experimente, Rollenspiele oder andere körperliche Aktivitäten, Augmented Reality oder taktil erfahrbaren Rückmeldungen.

Computerbasierte Modelliertools

Nicolaou und Constantinou (2014b) klassifizierten die in der Literatur beschriebenen Beispiele auf Grundlage der von Löhner et al. (2005) vorgeschlagenen Kategorien. Löhner unterscheidet dabei zwischen Systemmodelliertools, darunter gleichungsorientierte und diagramm- bzw. strukturorientierte Tools, und emergenzbasierten Tools, die sich auf Interaktionen zwischen diskreten Einheiten konzentrieren. Zu den gleichungsorientierten Tools gehören sowohl Programmierumgebungen, die eine Codierung erfordern (LOGO, Boxer) als auch gleichungsbasierte Tools, die keine Programmierung erfordern (DMS, Modellus, Dynamo). Diagramm- bzw. strukturorientierte Tools lassen sich weiter in quantitative (Stella, Powersim, Dynasim, Vensim, Functional Blocks) oder semiquantitative (IQON, VISQ, LinkIt, Modellt) Tools unterteilen. Emergenzbasierte Tools umfassen objektbasierte Tools (StarLogo, OOTL's) sowie zelluläre Automaten (AgentSheets, Stagecast Creator).

Einige in den analysierten Artikel verwendeten Tools lassen sich nicht eindeutig dieser Taxonomie zuordnen. So kombinieren Colab-basierte Tools diagrammatische Simulationselemente mit gleichungsorientierten Textelementen, während Microworlds LOGO sowohl als gleichungsorientierte Programmierumgebung als auch teilweise als agentenbasierte Plattform fungiert.

Langbeheim und Bielik (2025) unterscheiden zwischen constraint-basierten Tools und agentenbasierten Tools. Constraint-basierte Tools betrachten das System als Ganzes, während agentenbasierte Tools die einzelnen Komponenten bzw. Entitäten eines Systems in den Mittelpunkt stellen. Systemdynamische Tools, die die zentrale Form constraint-basierter Tools darstellen, verwenden Differentialgleichungen. Damit lässt sich beschreiben, wie sich Systemvariablen im Laufe der Zeit verändern und es ermöglicht die Anpassung dieser Variablen, um die Auswirkungen auf das gesamte System zu beobachten.

Beispiele für computergestützte Modelliertools für constraint-basierte Modelle sind z. B. Model-it, Stella und SageModeler. Agentenbasierte Modelle können in generischen Programmierumgebungen wie Boxer (DiSessa et al., 1991), Scratch (Resnick et al., 2009) und Logo (Papert, 1980) erstellt werden. Komplexere agentbasierte Modelle lassen sich in NetLogo (Wilensky & Reisman, 2006) und StarLogo (Han & Uhm, 2024; Pierson & Brady, 2020) erstellen.

Neben generischen Modelliertools existieren auch domänenspezifische Tools, die auf bestimmte Inhaltsbereiche ausgerichtet sind, wie bspw. Teilchensysteme oder Modelle zur Zellatmung¹. Diese Tools sind in ihrer Anwendung auf den jeweiligen Kontext beschränkt,

¹ <https://cellcollective.org/>

können jedoch leistungsfähiger sein, da typische Verhaltensweisen der jeweiligen Domäne bereits im Tool integriert sind.

In den analysierten Artikeln zeigt sich, dass in 13 Artikeln ein computergestütztes Modelliertool verwendet wurde, davon acht generische Modelliertools und fünf domänenspezifische Tools. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über diese Tools. Für diese Übersicht wurde keine weitere Eingrenzung auf bestimmte Artikel vorgenommen.

Tabelle 4: Übersicht über die in den untersuchten Artikeln vorkommenden Modelliertools

Tool-Art	Bildungsstufe	Forschungsgebiet	Thema	Referenz
<i>System-dynamische Tools</i>	Unterstufe	Geowissenschaften	Globaler Klimawandel, Temperatur der Erde	(Bhattacharya et al., 2021)
	Universität	Umwelt, Biologie	Förderung von Systemdenken und Perspektivübernahme durch modellbasiertes Lernen.	(Jordan et al., 2023)
	Universität	Chemie	Modellbasiertes Denken in der Chemie	(Khan, 2025)
<i>Gleichungsbasierte Tools</i>	Universität	Sonstiges	Unterstützte Projekte zum computergestützten Modellieren und Simulation im Ingenieurstudium.	(Magana et al., 2024)
	Universität	Biologie	Dynamik des zellulären Atmungssystems	(Lucas et al., 2022)
<i>Agentenbasierte Tools</i>	Unterstufe	Physik	Kinetische Molekulartheorie und Gasgesetze	(Peleg et al., 2024)
	Universität	Sonstiges	Bewertung von Software-Designs mithilfe von UML-Diagrammen	(Prasad & Iyer, 2022)
	Universität	Sonstiges	Lehrkräfteausbildung im Fach Naturwissenschaften. Programmierbasierte Erstellung naturwissenschaftlicher Simulationen und epistemologisches Verständnis von	(L. Vasconcelos & Kim, 2022)

Tool-Art	Bildungsstufe	Forschungsgebiet	Thema	Referenz
<i>Domänen-spezifische Tools</i>			Modellen.	
	Vorschule	Physik	Aggregatzustände und Phasenübergänge (Teilchencharakter der Materie)	(Samarapungavan et al., 2023)
	Oberstufe	Physik	Elektrostatische Wechselwirkungen	(Bozzo et al., 2022)
	Oberstufe	Physik	Auftrieb, Wärmekapazität und Druck in einer Flüssigkeit	(Chang et al., 2024)
	Oberstufe	Chemie	Elektrochemie (elektrochemische Zellen, Elektrolyse, Galvanisierung).	(Lin & Wu, 2021)
	Universität	Fächerübergreifend	Systemdenken und konzeptionelles Modellieren (OPM/OPCloud) in interdisziplinären Kontexten	(Peretz et al., 2023)

Aus der Tabelle geht hervor, dass die generischen Tools vor allem in der Sekundarstufe II sowie im tertiären Bildungsbereich eingesetzt werden, während in der Primar- und Sekundarstufe I häufiger domänenspezifische Tools verwendet werden. Dies könnte darauf hindeuten, dass die generischen Tools Fähigkeiten erfordern, die bei jüngeren Kindern noch nicht ausreichend ausgebildet sind. Die analysierte Literatur zeigt jedoch einige Beispiele, wie sich generische Tools auch für jüngere Schüler*innen zugänglicher gestalten lassen. Ein Beispiel ist der Einsatz KI-basierter Verfahren, die qualitativer Konzeptkarten in computergestützte Modelle überführen, wie dies beim MentalModeler-System der Fall ist (Jordan et al., 2023). Weitere Beispiele umfassen die Integration domänenspezifischer Elemente sowie qualitativer und semiquantitativer Modellertechniken in systemdynamische Modellertools, wie etwa bei SageModeler (Damelin et al., 2017).

Im Gegensatz zum englischsprachigen Literaturkorpus zeigt sich in der spanischsprachigen Literatur ein deutlich eingeschränkter Einsatz computergestützter Modellertools. Lediglich in einem Artikel wird eine digitale Modellierungsumgebung verwendet, nämlich tabellenkalkulationsbasierte Simulationen zur Modellierung von Ökosystemdynamiken (Domènech-Casal, 2020). Allgemeine Modellertools, wie systemdynamische oder agentenbasierte Tools fehlen im spanischen Datensatz weitgehend. Dies deutet darauf hin, dass computergestütztes Modellieren in dieser Literatur stärker an konkrete fachliche Kontexte gebunden ist und weniger übergreifend in Form generischer Modellierungsansätze eingesetzt wird.

Gesamtfazit und Diskussion

Hinsichtlich der ersten Forschungsfrage lassen sich drei zentrale Frameworks identifizieren: das Framework zur Modellierpraxis (NGSS, 2012), das modellbasierte Framework (Windschitl et al., 2008) und das Framework zur Modellierkompetenz (Upmeier zu Belzen et al., 2019). Im Mittelpunkt dieser Frameworks stehen verschiedene Aspekte der Modellierkompetenz, wie z. B. Metamodellierwissen, Modellierpraktiken, sowie weitere Aspekte wie Volition und Motivation. Die Literatur liefert wertvolle Einblicke in den derzeitigen Stand der Forschung und bildet eine Grundlage für die Entwicklung eines Frameworks im Rahmen des EMPOWER-Projekts.

Für die zweite Forschungsfrage sehen wir zunächst einen Bedarf an einer präziseren Ausarbeitung der Modellierprozesse, um die didaktische Unterstützung von Schüler*innen im Kontext von MbL gezielter gestalten zu können. In der Literatur finden sich unterschiedliche Varianten von Modellierzyklen, wobei der IPM-Zyklus eine neuere Entwicklung darstellt (Abb. 1). Obwohl Zyklen geeignete Mittel zur Darstellung von Prozessen sind, muss berücksichtigt werden, dass die Prozesse in der Praxis häufig weniger linear und strukturiert verlaufen. Daher erscheint es sinnvoller, einzelne Schritte des Modellierprozesses mit den jeweiligen Unterstützungsmöglichkeiten in den Fokus zu rücken. In Tabelle 1 wird dieser Ansatz über eine Reihe von exemplarischen Fragen operationalisiert, die in der Phase des Modellierprozesses unterstützend behandelt werden können. Ein zentrales Merkmal dieser Fragen ist die gleichzeitige Berücksichtigung sowohl des Modellierprozesses als auch des Metamodellierwissens. Die analysierten Artikel liefern hierzu verschiedene Beispiele zur Unterstützung verschiedener Aspekte des Modellierprozesses. Die wichtigsten Ergebnisse sind im entsprechenden Abschnitt dieses Reviews zusammengefasst (siehe Förderbedarf bei Schüler*innen im Bereich des Modellierens).

Wie aus dem gesamten Artikelkorpus, einschließlich der spanischen- und deutschsprachigen Artikel, hervorgeht, werden häufig Unterstützungsmöglichkeiten zur Modellkonstruktion in kontextgebundenen, praxisnahen Aufgaben eingesetzt (z. B. Osmose, Auftrieb, chemischen Reaktionen). Jedoch gibt es nur wenige Artikel, die explizite Unterstützung für das Testen und Überarbeiten von Modellen anbieten. In allen Artikeln liegt der Schwerpunkt auf *Auseinandersetzung mit dem Problem* und *Konstruktion des Modells*, während *Testen*, *Überarbeiten* und *Anwenden* von Modellen vergleichsweise selten adressiert werden.

In Bezug auf die Unterrichtsinhalte, die Gegenstand der dritten Forschungsfrage sind, zeigt sich eine große Vielfalt an Themenbereichen über alle Fächer der Naturwissenschaften hinweg. Ein erkennbarer Trend ist die zunehmende Bedeutung sozialwissenschaftlicher und umweltbezogener Themen wie bspw. Klimamodellierung, wodurch Modellieren zunehmend als übergreifende Kompetenz verstanden wird und nicht mehr ausschließlich als fachinterne Fähigkeit. Ebenfalls erkennbar ist, dass Modellieren in allen Altersgruppen (5-15 -Jährige) vorkommt. MbL in spanischsprachigen Artikeln ist häufig in authentischen sozio-ökologischen Kontexten verankert (z. B. Küstenmanagement, Konsum von Wasser in Flaschen, COVID-19-

Impfung), die zwar die Modellkonstruktion anregen, diese jedoch stark an spezifische Fachinhalte binden und so keinen übergeordneten Modellieransatz bereitstellen.

Hinsichtlich der vierten Forschungsfrage zeigt sich, dass MBL sowohl durch nicht-computergestützte Hilfsmittel wie physische Materialien, Zeichnungen und handlungsorientierte Aktivitäten als auch durch digitale Tools unterstützt werden kann. Zu den digitalen Tools zählen klassische systemdynamische Tools, gleichungsbasierte und agentenbasierte Modellierungsumgebungen sowie domänenspezifische Tools.

Zusammenfassend lässt sich ein klarer Trend erkennen, Modellierkompetenz in Form strukturierter Frameworks zu beschreiben, während gleichzeitig ein Mangel an didaktischen Unterstützungsmöglichkeiten für einzelne Kompetenzdimensionen der Modellierkompetenz besteht. Insbesondere für die jüngere Zielgruppe des EMPOWER-Projekts ist bislang unklar, wie sich die Modellierkompetenz mit zunehmendem Alter entwickelt. Vor dem Hintergrund, das beim MBL häufig Phänomene behandelt werden, die nicht direkt beobachtbar sind, erscheint das Metamodellierwissen besonders relevant, da Schüler*innen verstehen müssen, dass Modelle nicht die Realität selbst darstellen, sondern als vereinfachte Repräsentationen dienen. Schließlich zeigt sich, dass generische Modelliertools eher im Unterricht mit älteren Schüler*innen über 15 Jahren eingesetzt werden. Somit bleibt offen, inwiefern und in welcher Form diese Tools für die Zielgruppe unseres Projektes geeignet sind.

Referenzen

- Aalbergstjø, S. G., & Sollid, P. Ø. (2021). Learning through modelling in science: Reflections by pre-service teachers.
- Achurra, A., Berreteaga, A., & Zamalloa, T. (2022). La desnaturalización de las Ciencias de la Tierra en el currículo LOMCE de Educación Primaria: Un análisis curricular desde la perspectiva de la práctica científica. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 20(1), 1303. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2023.v20.i1.1303
- Arik, M., & Topçu, M. (2022). Computational Thinking Integration into Science Classrooms: Example of Digestive System. *Journal of science education and technology*, 31(1), 99–115. <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09934-z>
- Barab, S. A., Hay, K. E., Barnett, M., & Keating, T. (2000). Virtual solar system project: Building understanding through model building. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(7), 719–756.
- Bhattacharya, D., Steward, K., & Forbes, C. (2021). Climate education in secondary science: Comparison of model-based and non-model-based investigations of Earth's climate. *International journal of science education*, 43(13), 2226–2249. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1958022>
- Bielik, T., Stephens, L., McIntyre, C., Damelin, D., & Krajcik, J. S. (2022). Supporting Student System Modelling Practice Through Curriculum and Technology Design. *Journal of Science Education and Technology*, 31(2), 217–231. <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09943-y>
- Blikstein, P. (2014). Bifocal Modeling: Promoting Authentic Scientific Inquiry Through Exploring and Comparing Real and Ideal Systems Linked in Real-Time. *Gaming Media and Social Effects*, (Chapter 15), 317–352.
- Bozzo, G., Lopez, V., Couso, D., & Monti, F. (2022). Combining real and virtual activities about electrostatic interactions in primary school. *International journal of science education*, 44(18), 2704–2723. <https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2149284>

- Campbell, T., Gray, R., Bai, Y., & Chase, S. (2025). The Iterative Design of a Model-Based Inquiry Unit Planning Tool for Preservice Science Teachers. *Journal of science teacher education*, 36(6), 732–757. <https://doi.org/10.1080/1046560X.2024.2449289>
- Campbell, T., Oh, P. S., Maughn, M., Kiriazis, N., & Zuwallack, R. (2015). A Review of Modeling Pedagogies: Pedagogical Functions, Discursive Acts, and Technology in Modeling Instruction. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 11(1), 159–176. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2015.1314a>
- Cañero-Arias, J., Blanco-López, A., & Oliva, J. (2024). Model-based analysis of the impact of a teaching-learning sequence about carbonated drinks on students' understanding of the dissolution of gases in liquids. *International journal of science education*, 46(17), 1848–1878. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2300772>
- Chan, K. K. H., Lau, D. S. P., & Van Driel, J. (2025). Different Designs, Different Outcomes? A Critical Systematic Review of Interventions for Preparing Preservice Science Teachers to Teach Scientific Models and Modeling. *Science Education*, 109(2), 386–428. <https://doi.org/10.1002/sce.21911>
- Chang, H., Liu, C., Wen, C., Chang, M., Chiang, S., & Hwang, F. (2024). The effect of the cyclic curricular design of modelling-based instruction with virtual labs. *International journal of science education*, 46(1), 46–72. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2219365>
- Chiu, M.-H., & Lin, J.-W. (2019). Modeling competence in science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 1(1), 12–12. <https://doi.org/10.1186/s43031-019-0012-y>
- Constantinou, C. P., Nicolaou, C. Th., & Papaevripidou, M. (2019). A Framework for Modeling-Based Learning, Teaching, and Assessment. In A. Upmeyer zu Belzen, D. Krüger, & J. van Driel (Eds.), *Towards a Competence-Based View on Models and Modeling in Science Education* (pp. 39–58). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30255-9_3
- Crawford, B., & Cullin, M. (2005). Dynamic assessments of preservice teachers' knowledge of models and modelling. In *Research and the Quality of Science Education*. https://doi.org/10.1007/1-4020-3673-6_25
- Cruz-Guzmán, M., García-Carmona, A., & Criado, A. M. (2020). Analysis of the models proposed by prospective pre-primary teachers when studying water. *International Journal of Science Education*, 42(17), 2876–2897. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1841327>
- Cruz-Guzmán, M., García-Carmona, A., & Criado, A. M. (2023). “Teach Your Classmates About the Behavior of Water with School-Level Science Models”: An Experience in Initial Preschool Teacher Education. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 23(2), 262–281. <https://doi.org/10.1007/s42330-023-00283-0>
- Damelin, D., S. Krajcik, J., McIntyre, C., & Bielik, T. (2017). Integrating Technology: Students Making System Models. *Science Scope*, 40(5), 78–83. https://doi.org/10.2505/4/ss17_040_05_78
- De Alba Villaseñor, V., & Ramos de Robles, S. L. (2020). Modelización científica escolar para explorar el sistema circulatorio en Educación Infantil. *Enseñanza de Las Ciencias*, 38(1), 105–125.
- DiSessa, A. A., Abelson, H., & Ploger, D. (1991). An Overview of Boxer. *Journal of Mathematical Behavior*, 10, 3–15.
- Domènech-Casal, J. (2020). Diseñando un simulador de ecosistemas. Una experiencia STEM de enseñanza de dinámica de los ecosistemas, funciones matemáticas y programación. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 17(3), 3202. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i3.3202
- Dori, Y. J., & Kaberman, Z. (2012). Assessing high school chemistry students' modeling sub-skills in a computerized molecular modeling learning environment. *Instructional Science*, 40(1), 69–91.
- Durak, B., & Topcu, M. (2023). Integrating socioscientific issues and model-based learning to decide on a local issue: The white butterfly unit. *Science activities-projects and curriculum ideas in stem classrooms*, 60(2), 90–105. <https://doi.org/10.1080/00368121.2023.2179967>

- Durak, B., & Topçu, M. (2025). Exploring Teachers' Professional Development on Socioscientific Issues and Model-Based Learning: A Multiple Case Study. *Science & education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-025-00628-1>
- Engelschalt, P., Bielik, T., Krell, M., Krüger, D., & zu Belzen, A. U. (2024). Investigating pre-service science teachers' metaknowledge about the modelling process and its relation to metaknowledge about models. *International Journal of Science Education*, 46(7), 691–714. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2253368>
- Enyedy, N., Danish, J. A., Delacruz, G., & Kumar, M. (2012). Learning physics through play in an augmented reality environment. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 7(3), 347–378. <https://doi.org/10.1007/s11412-012-9150-3>
- Ergazaki, M., Zogza, V., & Komis, V. (2007). Analysing students' shared activity while modeling a biological process in a computer-supported educational environment. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(2), 158–168.
- Erumit, B., & Yuksel, T. (2023). Developing and Using Physical Dynamic Models On Socioscientific Issues to Present Nature Of Science Ideas. *International journal of science and mathematics education*, 21(4), 1031–1056. <https://doi.org/10.1007/s10763-022-10296-0>
- Everett, S. A., Otto, C. A., & Luera, G. R. (2009). Preservice elementary teachers' growth in knowledge of models in a science capstone course. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 7(6), 1201–1225. <https://doi.org/10.1007/s10763-009-9158-y>
- García-Rodeja, I., Rodríguez Rouco, E. V., Lorenzo Flores, M., & Sesto Varela, V. (2023). Construyendo modelos precursores sobre la flotabilidad de objetos macizos a los seis años. *Enseñanza de Las Ciencias*, 41(2), 137–154.
- Garrido, A., & Couso, D. (2025). The IPM cycle: An instructional tool for promoting students' engagement in modeling practices and construction of models. *Journal of Research in Science Teaching*, 62(2), 391–425. <https://doi.org/10.1002/tea.21979>
- Geçgil, T., & Akçay, H. (2024). Investigating the Effects of Different Model Based Inquiries on Students' Science Achievement, Scientific Process Skills and Motivation. *International journal of education in mathematics science and technology*, 12(3). <https://doi.org/10.46328/ijemst.3997>
- Gilbert, J. K., & Justi, R. (2016). The Contribution of Visualisation to Modelling-Based Teaching. In *Models and Modeling in Science Education Modelling-based Teaching in Science Education* (9th ed., pp. 121–148). Springer International Publishing Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29039-3_7
- Gobert, J. D. (2000). A typology of causal models for plate tectonics: Inferential power and barriers to understanding. *International Journal of Science Education*, 22, 937–977.
- Göhner, M. F., Bielik, T., & Krell, M. (2022). Investigating the dimensions of modeling competence among preservice science teachers: Meta-modeling knowledge, modeling practice, and modeling product. *Journal of Research in Science Teaching*, 59(8), 1354–1387. <https://doi.org/10.1002/tea.21759>
- Gouvea, J., & Passmore, C. (2017). 'Models of' versus 'Models for.' *Science & Education*, 26(1), 49–63. <https://doi.org/10.1007/s11191-017-9884-4>
- Grimalt-Álvaro, C., Ortega Torres, E., Couso Lagarón, D., & Paloma Romeu, L. (2021). Influencia en la autoeficacia del grado de autenticidad de la indagación de dos proyectos de ciencia de secundaria: Estudio de caso. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 18(2), 2101. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i2.2101
- Guimarães Siles, C., & Peticarrari, A. (2025). El uso de modelos en la enseñanza investigativa para promover la participación activa de los alumnos de la educación primaria. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 23(1), 1102. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2026.v23.i1.1102
- Han, M., & Uhm, J. (2024). Enhancing Students' Emotional, Epistemic, and Conceptual Aspects in Scientific Practice through Computational Modeling on a Food Web. *International Journal of*

- Science and Mathematics Education*, 22(S1), 145–165. <https://doi.org/10.1007/s10763-024-10509-8>
- Hansen, J. A., Barnett, M., MaKinster, J. G., & Keating, T. (2004). The impact of three-dimensional computational modeling on student understanding of astronomical concepts: A quantitative analysis. *International Journal of Science Education*, 26(11), 1365–1378. <https://doi.org/10.1080/09500690420001673757>
- Jia, S., & Ren, S. (2025). The Significance of Science Content Knowledge for Socioscientific Reasoning Competency: Evidence from SSI Instruction on Environmental Topics Based on the SIMBL Model. *Science & education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-025-00645-0>
- Jimenez-Liso, M., Bellocchi, A., Martinez-Chico, M., & Lopez-Gay, R. (2022). A Model-Based Inquiry Sequence as a Heuristic to Evaluate Students' Emotional, Behavioural, and Cognitive Engagement. *Research in science education*, 52(4), 1313–1334. <https://doi.org/10.1007/s11165-021-10010-0>
- Jiménez-Liso, M. R., Delgado, L., Castillo-Hernández, F. J., & Baños-González, I. (2021). Contexto, indagación y modelización para movilizar explicaciones del alumnado de secundaria. *Enseñanza de Las Ciencias*, 39(1), 5–25.
- Jin, D., & Jian, M. (2024). Research hotspots and development trends of model and modelling education research: Bibliometric analysis based on CiteSpace. *Heliyon*, 10(11), e32590. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32590>
- Jordan, R., Gray, S., Boyse-Peacor, A., Sorensen, A., Frantz, C., Jauernig, J., Brehm, P., Shammin, M., & Petersen, J. (2023). Promoting systems thinking through perspective taking when using an online modeling tool. *Frontiers in education*, 8. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1215436>
- Khan, S. (2025). Reasoning in chemistry teacher education. *Chemistry teacher international*, 7(2), 345–357. <https://doi.org/10.1515/cti-2024-0099>
- Lacy, S., Tobin, R., Crissman, S., DeWater, L., Gray, K., Haddad, N., Hammerman, J., & Seeley, L. (2022). Telling the energy story: Design and results of a new curriculum for energy in upper elementary school. *SCIENCE EDUCATION*, 106(1), 27–56. <https://doi.org/10.1002/sce.21684>
- Langbeheim, E., & Bielik, T. (2025). Student engagement in constructing computer models in K-12 science education: A systematic review. *Studies in Science Education*, 1–28. <https://doi.org/10.1080/03057267.2025.2576997>
- Lin, C., & Wu, H. (2021). Effects of different ways of using visualizations on high school students' electrochemistry conceptual understanding and motivation towards chemistry learning. *Chemistry education research and practice*, 22(3), 786–801. <https://doi.org/10.1039/d0rp00308e>
- Lindgren, S., Morris, K., & Price, A. (2021). Designing environmental storylines to achieve the complementary aims of environmental and science education through science and engineering practices. *Journal of environmental education*, 52(4), 239–255. <https://doi.org/10.1080/00958964.2021.1949569>
- Liu, S. (2021). Using drawings to examine undergraduate students' mental models of the greenhouse effect: A factor analysis approach. *International journal of science education*, 43(18), 2996–3017. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.2004466>
- Lobner, K., Voitle, F., Ziernwald, L., Bielik, T., & Krell, M. (submitted). Definitions and Frameworks of Modeling Competence in Science Education Research – A Scoping Review.
- Löhner, S., van Hout-Wolters, B., van Joolingen, W., & Savelsbergh, E. R. (2005). Computer based modeling tasks: The role of external representation [Graphic]. In *Society and behavioral sciences* (Issue Chapter 13, pp. 243–263). University of Amsterdam. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4366-3_13/fulltext.html
- Löhner, S., van Joolingen, W., & Savelsbergh, E. R. (2003). The Effect of External Representation on Constructing Computer Models of Complex Phenomena. *Instructional Science*, 31, 395–418.

- 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>
- Louca, L. T., Zacharia, Z. C., & Constantinou, C. P. (2011). In Quest of productive modeling-based learning discourse in elementary school science. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(8), 919–951.
- Lucas, L., Helikar, T., & Dauer, J. (2022). Revision as an essential step in modeling to support predicting, observing, and explaining cellular respiration system dynamics. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE EDUCATION*, 44(13), 2152–2179. <https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2114815>
- Magana, A., Arigye, J., Udosen, A., Lyon, J., Joshi, P., & Pienaar, E. (2024). Scaffolded team-based computational modeling and simulation projects for promoting representational competence and regulatory skills. *International journal of stem education*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s40594-024-00494-3>
- Maia, P. F., & Justi, R. (2009). Learning of Chemical Equilibrium through Modelling-based Teaching. *International Journal of Science Education*, 31, 603–630. <https://doi.org/10.1080/09500690802538045>
- Margolin, J., Pinerua, I., & Gerdeman, D. (2022). Modeling in Science Education: A Synthesis of Recent Discovery Research PreK-12 Projects. *American Institutes for Research*. <https://par.nsf.gov/biblio/10358422-modeling-science-education-synthesis-recent-discovery-research-prek-projects>
- Muñoz Campos, V., Franco-Mariscal, A. J., & Blanco-López, Á. (2020). Integración de prácticas científicas de argumentación, indagación y modelización en un contexto de la vida diaria. Valoraciones de estudiantes de secundaria. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 17(3), 3201. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i3.3201
- Nelson, M. M., & Davis, E. A. (2012). Preservice Elementary Teachers' Evaluations of Elementary Students' Scientific Models: An aspect of pedagogical content knowledge for scientific modeling. *International Journal of Science Education*, 34(12), 1931–1959. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.594103>
- Nicolaou, C. T., & Constantinou, C. P. (2014a). Assessment of the modeling competence: A systematic review and synthesis of empirical research. *Educational Research Review*, 13, 52–73.
- Nicolaou, Chr. Th., & Constantinou, C. P. (2014b). Assessment of the modeling competence: A systematic review and synthesis of empirical research. *Educational Research Review*, 13, 52–73. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2014.10.001>
- Ogborn, J., & Wong, D. (1984). A microcomputer dynamical modelling system. *Physics Education*, 19, 138–142.
- 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>
- Oliva, J. M., Aragón Méndez, M. M., Soto Mancera, F., Vicente Martorell, J. J., Matos Delgado, J., Marín Barrios, R., & Franco-Mariscal, R. (2021). ¿Varía la masa de la Tierra? Modelizando a partir de un experimento mental. *Enseñanza de Las Ciencias*, 39(2), 25–43.
- Papaevripidou, M., Constantinou, C. P., & Zacharia, Z. C. (2007). Modeling complex marine ecosystems: An investigation of two teaching approaches with fifth graders. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(2), 145–157.
- Papert, S. (1980). "Mindstorms"Children. *Computers and Powerful Ideas*. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10003835700/en/>
- Paz Otero, A., & Puig, B. (2020). Una secuencia para promover la alfabetización geocientífica y educación patrimonial en secundaria. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 17(2), 2202. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i2.2202

- Pedrerá, O., Barrutia, O., & Díez, J. (2025). Effectiveness of a model-based inquiry instructional sequence in overcoming students' teaching-learning difficulties on plant nutrition. *International journal of science education*, 47(6), 794–816. <https://doi.org/10.1080/09500693.2024.2350705>
- Peleg, R., Lahav, O., Hagab, N., Talis, V., & Levy, S. (2024). Listening to or looking at models: Learning about dynamic complex systems in science among learners who are blind and learners who are sighted. *Journal of computer assisted learning*, 40(2), 452–464. <https://doi.org/10.1111/jcal.12886>
- Peretz, R., Tal, M., Akiri, E., Dori, D., & Dori, Y. (2023). Fostering engineering and science students' and teachers' systems thinking and conceptual modeling skills. *Instructional science*, 51(3), 509–543. <https://doi.org/10.1007/s11251-023-09625-9>
- Pierson, A. E., & Brady, C. E. (2020). Expanding Opportunities for Systems Thinking, Conceptual Learning, and Participation through Embodied and Computational Modeling. *Systems*, 8(4), 48. <https://doi.org/10.3390/systems8040048>
- Pluta, W. J., Chinn, C. A., & Duncan, R. G. (2011). Learners' epistemic criteria for good scientific models. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(5), 486–511. <https://doi.org/10.1002/tea.20415>
- Prasad, P., & Iyer, S. (2022). VeriSIM: A model-based learning pedagogy for fostering software design evaluation skills in computer science undergraduates. *Research and practice in technology enhanced learning*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s41039-022-00192-0>
- Resnick, M., Maloney, J., Monroy-Hernández, A., Rusk, N., Eastmond, E., Brennan, K., Millner, A., Rosenbaum, E., Silver, J., Silverman, B., & Kafai, Y. (2009). Scratch: Programming for all. *Commun. ACM*, 52(11), 60–67. <https://doi.org/10.1145/1592761.1592779>
- Rodríguez Mora, F., & Blanco López, Á. (2020). Diseño de una secuencia de enseñanza-aprendizaje para el desarrollo de competencias científicas en el contexto del consumo de agua envasada. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 18(1), 1803. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i1.1803
- Samarapungavan, A., Bryan, L., Staudt, C., Sapkota, B., Pinto, H., Broadhead, J., & Kimball, N. (2023). Using technology-mediated inquiry to help young learners reimagine the visible world through simple particle models. *Journal of research in science teaching*, 60(2), 390–422. <https://doi.org/10.1002/tea.21802>
- Schwarz, C. V., Ke, L., Salgado, M., & Manz, E. (2022). Beyond assessing knowledge about models and modeling: Moving toward expansive, meaningful, and equitable modeling practice. *Journal of Research in Science Teaching*. <https://doi.org/10.1002/tea.21770>
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., Shwartz, Y., Hug, B., & 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.
- Schwarz, C. V., & White, B. Y. (2005). Metamodeling Knowledge: Developing Students' Understanding of Scientific Modeling. *Cognition and Instruction*, 23(2), 165–205.
- Sins, Patrick. H. M., Savelsbergh, E. R. E. R., van Joolingen, W. W. R., & van Hout-Wolters, B. H. A. M. (2009). The Relation between Students' Epistemological Understanding of Computer Models and Their Cognitive Processing on a Modelling Task. *International Journal of Science Education*, 31(9), 1205–1229. <https://doi.org/10.1080/09500690802192181>
- Stratford, S. J., Krajcik, J., & Soloway, E. (1998). Secondary Students' Dynamic Modeling Processes: Analyzing, Reasoning About, Synthesizing, and Testing Models of Stream Ecosystems. *Journal of Science Education and Technology*, 7(3), 215–234.
- Tang, X., Shu, G., Wei, B., & Levin, D. (2024). Emergent learning about measurement and uncertainty in an inquiry context: A case from an elementary classroom. *Science education*, 108(1), 308–331. <https://doi.org/10.1002/sce.21837>

- Torres, J., & Vasconcelos, C. (2016). Models in Geoscience Classes: How Can Teachers Use Them? In C. Vasconcelos (Ed.), *Geoscience Education: Indoor and Outdoor* (pp. 25–41). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43319-6_2
- Torres, J., & Vasconcelos, C. (2021). Models and the Nature of Science: What Mediates Their Implementation in Portuguese Biology and Geology Classes? *Education Sciences*, 11(11), 688. <https://doi.org/10.3390/educsci11110688>
- Upmeier Zu Belzen, A., Van Driel, J., & Krüger, D. (2019). Introducing a Framework for Modeling Competence. In A. Upmeier Zu Belzen, D. Krüger, & J. Van Driel (Eds.), *Towards a Competence-Based View on Models and Modeling in Science Education* (Vol. 12, pp. 3–19). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30255-9_1
- Valanides, N., & Angeli, C. (2008). Professional development for computer-enhanced learning: A case study with science teachers. *Research in Science & Technological Education*, 26(1), 3–12. <https://doi.org/10.1080/02635140701847397>
- van Borkulo, S. P., van Joolingen, W. R., Savelsbergh, E. R., & de Jong, T. (2012). What can be learned from computer modeling? Comparing expository and modeling approaches to teaching dynamic systems behavior. *Journal of Science Education and Technology*, 21, 267–275.
- Vasconcelos, L., & Kim, C. (2022). Preservice science teachers coding science simulations: Epistemological understanding, coding skills, and lesson design. *Educational technology research and development*, 70(4), 1517–1549. <https://doi.org/10.1007/s11423-022-10119-7>
- Wilensky, U., & Reisman, K. (2006). Thinking Like a Wolf, a Sheep, or a Firefly: Learning Biology Through Constructing and Testing Computational Theories—An Embodied Modeling Approach. *Cognition and Instruction*, 24(2), 171–209.
- Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92(5), 941–967. <https://doi.org/10.1002/sce.20259>
- Zhai, X., & Yin, Y. (2024). Using educative learning progression to support novice science teachers' lesson plan critiques. *International journal of science education*, 46(13), 1281–1310. <https://doi.org/10.1080/09500693.2023.2285259>
- Zhang, B., Liu, X., & Krajcik, J. S. (2006). Expert Models and Modeling Processes Associated with a Computer-Modeling Tool. *Science Education*, 90(4), 579–604.