

Rieke Ammoneit*, Christoph Reudenbach**, Andreas Turek***,
Thomas Nauß**** & Carina Peter*****

Geographische Modellierkompetenz – Modellierung von Raum konzeptualisieren

* rieke.ammoneit@geo.uni-marburg.de, Fachbereich Geographie, Philipps-Universität Marburg

** reudenbach@geo.uni-marburg.de, Fachbereich Geographie, Philipps-Universität Marburg

*** andreas.turek@geo.uni-marburg.de, Fachbereich Geographie, Philipps-Universität Marburg

**** nauss@geo.uni-marburg.de, Fachbereich Geographie, Philipps-Universität Marburg

***** carina.peter@geo.uni-marburg.de, Fachbereich Geographie, Philipps-Universität Marburg

eingereicht am: 15.07.2019, akzeptiert am: 30.10.2019

In diesem Beitrag wird, basierend auf theoretischer und empirischer Forschung sowie den Bildungsstandards der Deutschen Gesellschaft für Geographie, ein Kompetenzmodell für das Modellieren im Kontext einer geographischen Bildung entwickelt. Die Stufung des Modells wird aus den Systemkomponenten Struktur, Funktion, Prozess abgeleitet. Modellieren umfasst auf jeder Stufe die vier Modellierpraktiken Entwerfen, Anwenden, Evaluieren und Revidieren, die zyklisch eingesetzt werden und die Dimensionen des Modells bilden.

Keywords: Modellieren, Modellkompetenz, Geographieunterricht, Kompetenzmodell

Geographic modelling competence – conceptualising the modelling of space

Based on recent international research on modelling in science education and geographical concepts a competency model for geographic modelling is presented in this article. Within this model three consecutive levels are being modelled: structure, function and process. These levels mark the difficulty in the competence model. Within each level four modelling practices are deployed in a cyclic manner: draft, use, evaluate and revise. Each of these practices forms one dimension within the competency model.

Keywords: modelling, model competencies, geography education, competency model

1 Einleitung

„The history of man [...] is the history of model building“ (Rivett 1972: 2). Die große Bedeutung von Modellen liegt in der Breite des Begriffs begründet. Aufbauend auf dem Modellbegriff von Mahr (2008) ist alles ein Modell, was dazu erklärt wird und gleichzeitig Modell von etwas für einen Zweck ist (vgl. Mahr 2008). Ein Modell muss also keine gegenständliche Nachbildung sein, vielmehr kann auch etwa das Erdenken von graphischen Abbildungen, mathematischen Gleichungen und Computersimulationen modellieren bedeuten, solange dabei Interessensgegenstände zweckgerichtet abgebildet werden. Die Modellierung hilft uns die Welt durch Reduktion verständlicher zu machen (vgl. Stachowiak 1973), sie

wird interpretier-, prognostizier- und gestaltbar. Diese Eigenschaften verleihen der Modellierung und den Modellen, traditionell auch in der Geographie und den geographischen Bildungskontexten, eine besondere Bedeutung, sind doch Globen, Karten, Stadtmodelle, Klimamodelle etc. reduzierte Abbildungen. Dies wird auch mit Blick auf die Bildungsstandards der Deutschen Gesellschaft für Geographie (DGfG 2017) für das Schulfach Geographie deutlich, in denen konkret der Operator *Modell entwerfen* aufgeführt wird. Der Annahme folgend, dass die Modellentwicklung zur Strukturierung der komplexen Welt maßgeblich beiträgt (vgl. Rivett 1972), nimmt sie auch im Zusammenhang mit räumlichem Denken (spatial thinking) eine zentrale Rolle ein und sollte im geographischen Bildungskontext forciert werden.

Modellieren kann daher als ein vielgestaltiges Konstrukt betrachtet werden, dem auch in geographischen Bildungskontexten eine hervorgehobene Bedeutung zukommt. Damit Modellieren im Bildungsprozess operationalisier- und somit anwendbar wird, wird in diesem Artikel ein Kompetenzmodell zur Modellierkompetenz theoretisch abgeleitet und das Potenzial der Komplexitätsreduktion durch Modellierung für die geographische Bildung eruiert.

Die theoretische Voraussetzung des Modellieren für den Geographieunterricht zweckdienlich zu konzeptualisieren, erfordert die Synthese der Grundlagen von Geographieunterricht und Modell- und Modellierkompetenz. Beide Ebenen werden im Folgenden betrachtet und in das Kompetenzmodell überführt. Aufbauend auf der Modelltheorie, insbesondere von Mahr (2008), wurde das reflektierende Verständnis von Modellen in der Biologiedidaktik als Modellkompetenz gefasst und umfassend evaluiert (Upmeyer zu Belzen & Krüger 2010; Grünkorn & Krüger 2012; Krell & Krüger 2013), für die Naturwissenschaftsdidaktik verallgemeinert (Kauertz et al. 2010; Krüger et al. 2018; Upmeyer zu Belzen et al. 2019) und aktuell in der Geographiedidaktik vorgestellt (Bette et al. 2019). Bette et al. bauen damit auf die Entwicklung innerhalb der Geographiedidaktik auf, die Modellentwicklung ausgehend von einer Beschreibung von Modellen im Unterricht zur Veranschaulichung (vgl. Wirth 1979; Wiktorin 2013) hin zu einer Nutzung, insbesondere auch zur Herleitung von wissenschaftlicher Erkenntnis, (vgl. Wiktorin 2014; Otto & Mönter 2015; Brucker 2016; Peter 2018; Raschke 2018) betrachtet. Vor allem in der deutschsprachigen Rezeption bedingte die Reflexion bestehender Modelle und eines modellbasierten Wissenschaftsparadigmas Forschungsansätze um aktives Modellieren durch die Schüler/innen selbst und somit das Schaffen eigener Modelle zu beschreiben (vgl. Krell et al. 2019; Krüger et al. 2018; Upmeyer zu Belzen et al. 2019). Zu dieser prozessbezogenen Modellierkompetenz liegen erste theoretische und empirische Arbeiten aus Biologie, Physik und allgemeinem naturwissenschaftlichen und technischen Unterricht vor (Schwarz et al. 2009; Nicolaou & Constantinou 2014; Papaevripidou et al. 2014; Mislevy et al. 2017; Krell et al. 2019). In diesen wurden unter anderem Kompetenzmodelle entwickelt und im naturwissenschaftlichen und technischen Unterricht getestet (Louca et al. 2011; Tsivitanidou et al. 2018). Die aus diesen Arbeiten resultierenden unterschiedlichen Begrifflichkeiten, Betrachtungsebenen und fachliche Fokussierungen werden in diesem Aufsatz übereingebracht und auf eine geographische Herangehensweise angewendet, da der fachliche Kontext im Umgang mit Modellen essentiell ist (vgl. Krell et al. 2015; Krüger et al. 2018), für die Geographie aber

diesbezüglich noch keine fachspezifischen Konzepte vorliegen.

Einen Rahmen für den Geographieunterricht definieren die Bildungsstandards der Deutschen Gesellschaft für Geographie (DGfG 2017), laut denen sich das Fach zum einen „zentral mit der Kategorie Raum beschäftigt, zum anderen verbindet es natur- und gesellschaftswissenschaftliches Wissen und ist somit Brückenfach zwischen diesen Wissenschafts- und Bildungsbereichen“ (DGfG 2017: 5). Die resultierende Problematik hinsichtlich der fachlichen Fokussierung und Einordnung sei exemplarisch durch Uhlenwinkel skizziert: „[...] interdisciplinary in itself [is] opening the door for an undifferentiated variety of contents that may be derived from all sorts of other subjects [...], but very often is simply taken from the everyday experience of the teacher [...]“ (Uhlenwinkel 2018: 41). Wird jedoch die Brückenfunktion nicht neben die Raumbetrachtung gestellt, sondern werden zur Beantwortung von räumlichen Fragestellungen Wissenschafts- und Bildungsbereiche zweckgerichtet verbunden, erwächst aus der Anwendung von räumlichem Denken (spatial thinking) geographisches Denken (geographical thinking) (vgl. Metoyer & Bednarz 2017: 21). Diesen Zugang modellierend zu gestalten ist ein Ziel des Artikels. Dabei werden sowohl Orientierungskompetenz, die die Raumwahrnehmung sowie die Raumdarstellung umfasst, als auch darauf aufbauend Fachkompetenz geschult. Diese wird laut Bildungsstandards als die Fähigkeit beschrieben Räume als Systeme zu betrachten und auf verschiedenen Maßstabsebenen auf Funktion, Struktur, Prozess hin zu analysieren (DGfG 2017).

Systemdenken wurde in der Geographiedidaktik umfassend beforscht (Viehrig et al. 2011; Rieß et al. 2015; Mehren et al. 2016; Viehrig 2017; Mehren et al. 2018; Schuler et al. 2018; Brockmüller 2019). Die räumliche Dimension im Systemdenken wurde vor allem von Viehrig et al. (2011) explizit als eigenständig benannt. In diesem Artikel kommt hingegen der räumlichen Perspektive eine fundamentale und integrierende Rolle zu, auf der jedes Modell fußt. Zur Modellbildung muss ausgehend vom Realraum Komplexität systematisch reduziert werden. Dazu werden laut der Systemtheorie z. B. nach Bossel (2004) Systemgrenzen gezogen und Systemelemente dem Modellzweck nach auf die wesentlichen Elemente reduziert, um darauf aufbauend funktionale Zusammenhänge zu definieren, die nach einer Quantifizierung für [Prozess-]simulationen genutzt werden können (vgl. Bossel 2004). In einer systemtheoretisch fundierten Modellierungspraxis muss die ethische Dimension (vgl. Felzmann & Mayer 2011; Mehren et al. 2015) auf der fachlichen Modellierung aufbauend diskutiert werden. Diese Handlungsdi-

mension ist jedoch nicht Teil der hier diskutierten Komplexitätsreduktion. Stattdessen liegt der Fokus dieses Beitrags auf der Tätigkeit des Modellierens, die als methodischer Zugang zu verstehen ist und sowohl für die Darstellung von Raum als auch für die Analyse von Systemen (vgl. Viehring 2011; Wiktorin 2014; Rieß et al. 2015; Brockmüller 2019) genutzt wird. Sie liefert so die Grundlage einer darüberhinausgehenden Beschäftigung mit Komplexität.

Auf diesem Gedankengang aufbauend kann ein Desiderat abgeleitet werden: Es bedarf eines geographiedidaktischen Konzepts, das Modellierpraktiken nutzt, um die notwendige Komplexitätsreduktion zur Bearbeitung räumlicher Fragestellung zu erreichen. Wir konkretisieren das Ziel dahingehend, dass ein Konzept des geographischen Modellierens unter Integration geographischer Basiskonzepte hergeleitet und methodisch begründet werden soll. Unter Rückgriff auf theoretische und empirische Arbeiten zum Modellieren wird daraus ein Kompetenzmodell zur Modellierungskompetenz theoretisch abgeleitet.

2 Methodisches Vorgehen

Um geographische Modellierkompetenz differenziert betrachten zu können, ist ein Kompetenzmodell zu erstellen, das die Operationalisierung von Tests und die gezielte Förderung der Kompetenz ermöglichen wird. Kompetenzmodelle dienen dazu Kompetenzen in verschiedene Dimensionen, also in Teilbereiche, zu strukturieren (vgl. Mayer & Wellnitz 2014) und die Schwierigkeit bzw. Niveaus durch aufeinander aufbauende Stufen zu gliedern (vgl. Hartig & Klieme 2006; Klieme & Leutner 2006).

Geographisches Modellieren ist nach Weinert (2001) eine Kompetenz, da es einen fachdidaktischen Bildungsbereich darstellt, innerhalb dessen sich Könnerschaft zurückführen lässt auf „kontextspezifische kognitive Leistungsdispositionen, die sich funktional auf bestimmte Klassen von Situationen und Anforderungen beziehen. Diese spezifischen Leistungsdispositionen lassen sich als Kenntnisse, Fertigkeiten oder Routinen charakterisieren.“ (Definition nach Hartig & Klieme 2006: 126, vgl. Weinert 2001: 57 in englischer Sprache). Die Förderbarkeit der Modellierpraktiken lässt sich aus empirischen Befunden ableiten (Papaevripidou et al. 2007; Tsivitanidou et al. 2018). Dieses Erkenntnis stützt das Vorhaben, das geographische Modellieren als Kompetenz zu modellieren.

Für eine theoriebasierte Entwicklung müssen grundsätzlich das nomologische Netzwerk, theoretische und empirische Forschung, sowie der präskriptive Rahmen einbezogen werden (vgl. Mayer & Wellnitz 2014). Es werden deshalb die Ergebnisse didaktischer

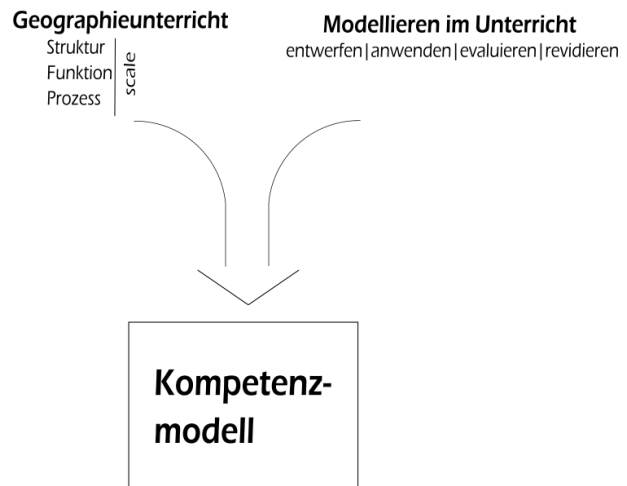


Abb. 1: Grundlage des Kompetenzmodells (eigene Darstellung)

Forschung zu modellierender Tätigkeit und geographische Bildungsziele innerhalb des diskutierten Forschungskontextes (Kapitel 1) vereint (s. Abb. 1). Für eine möglichst breite Grundlage der didaktischen Herleitung modellierender Tätigkeit werden verschiedene Forschungszugänge integriert. Es wird hierzu an didaktische Studien angeschlossen, die theoretische Konzepte umfassend empirisch umgesetzt haben (Schwarz et al. 2009; Papaevripidou et al. 2014). Diese werden verknüpft mit psychometrischer Expertise zur Messung von Modellieren (Mislevy et al. 2017) und den Erkenntnissen zur Modellierpraxis von Krell et al. (2019), die eine erste empirische Studie auf der Grundlage des Konzepts zur Modellkompetenz von Upmeyer zu Belzen und Krüger (2010) darstellt. Auf dieser Grundlage werden strukturierend die vier Dimensionen *entwerfen*, *anwenden*, *evaluieren* und *revidieren* abgeleitet. Die zugrunde gelegten geographischen Bildungsziele sind durch die Bildungsstandards (DGfG 2017) definiert. Die dort beschriebenen Basiskonzepte *Struktur*, *Funktion*, *Prozess* werden in drei aufeinander aufbauende Stufen modellierender Tätigkeit untergliedert. Diese Einteilung lässt sich mit den Komplexitätsabstufungen in bestehenden Arbeiten zum Modellieren übereinbringen (Papaevripidou 2014). Im Folgenden wird die theoretische Herleitung ausgeführt und das Kompetenzmodell vorgestellt.

3 Didaktische Konstruktion des Modellierens

Die Struktur des Modellierens kann als zyklisch aufgefasst werden, wie sich aus didaktischer Forschung fachunabhängig ableiten lässt (vgl. Gilbert et al. 2000; Papaevripidou et al. 2007; Schwarz et al. 2009; Oh und Oh 2011; Mislevy et al. 2017; Krell 2019). Die Arbeitsschritte beziehen sich dabei iterativ auf-

einander, daraus ergibt sich die Schwierigkeit einen Arbeitsprozess zu strukturieren, der weder linear ist noch in aufeinander aufbauenden Stufen beschrieben werden kann. Als geeignete Grundlage erscheint der von Schwarz et al. (2009) entwickelte Ansatz einer Charakterisierung des Prozesses durch Modellierpraktiken, die sich aufeinander beziehen und im Arbeitsprozess wiederholt eingesetzt werden, der in empirischer Forschung vielfach Verwendung findet (Schwarz & Gwekwerere 2007; Schwarz 2009; Schwarz et al. 2009; Hokayem & Schwarz 2014; Forbes et al. 2015; Bierema et al. 2017; Zangori et al. 2017; Baumfalk et al. 2019). Auf diesem Ansatz aufbauend wird von der Forschungsgruppe um Papaevripidou empirisch weitergearbeitet, allerdings unter einer leichten inhaltlichen Abwandlung der einzelnen Praktiken (Louca et al. 2011; Papaevripidou et al. 2007, 2014, 2015; Nicolaou & Constantinou 2014; Papaevripidou & Zacharia 2015; Tsivitanidou et al. 2018). Um zu einer eigenen Nuancierung der Modellierpraktiken zu gelangen, wurde auch die davon unabhängige aus psychometrischer Perspektive entstandene Arbeit von Mitlevy et al. (2017) hinzugezogen, die im US-Kontext, unter Kooperation von ETS (Educational Testing Service) und SRI International (Stanford Research Institute), design pattern zur Modellierfähigkeit entlang der Next Generation Science Standards formuliert und sich ebenfalls in Modellierpraktiken einordnen lässt. Zur Integration der deutschen Diskussion wurden die jüngeren Arbeiten von Krell und Krüger hinzugezogen, die modellierende Tätigkeit qualitativ mit Hilfe eines Kategoriensystems beschreiben (Krell et al. 2019; Krüger et al. 2018). Aus diesem

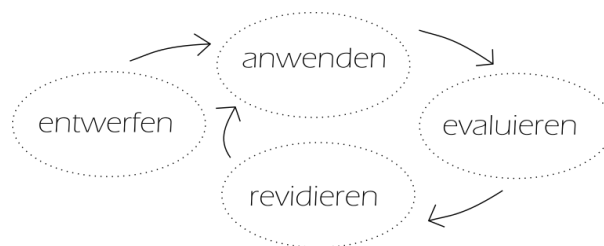


Abb. 2: Modellierkreislauf (eigene Darstellung)

Forschungsstand werden vier Modellierpraktiken zusammenfassend abgeleitet (siehe Tab. 1): entwerfen, anwenden, evaluieren, revidieren (siehe Abb. 2).

1. *Entwerfen* ist die Setzung des Rahmens und Konstruktion oder Formulierung eines initialen Modells. Die kleinschrittigeren Kategorien *Wahrnehmung des Phänomens* und *Aktivierung von Analogien und Vorwissen* von Krell et al. (2019) werden in diese Praktik integriert.
2. *Anwenden* ist die deduktive Ableitung von Aussagen bzw. Daten aus einem Modell, das Modell wird hierzu genutzt.
3. *Evaluieren* ist das Vergleichen dieser Aussagen bzw. Daten mit Externem, d.h. sowohl mit anderen Modellen und Theorien als auch mit empirisch erhobenen Daten. Der Modellvergleich, den Papaevripidou et al. (2014) nennen, ist Teil dieser Praktik.
4. *Revidieren* ist die Integration neuer Erkenntnisse in ein bestehendes Modell.

Die Modellelaboration und -artikulation von Mitlevy et al. (2017) werden nicht explizit mit aufgenommen, da sie keine wiederkehrenden Modellierpraktiken beschreiben, sondern Fähigkeiten, die im

Tab. 1: Modellierpraktiken in bildungswissenschaftlicher Literatur

	Papaevripidou et al. 2014	Schwarz et al. 2009	Mitlevy et al. 2017	Krell et al. 2019
Modellierpraktiken				
Entwurf	Modellkonstruktion	Konstruieren	Modellformulierung	Wahrnehmung des Phänomens, Aktivierung von Analogien und Erfahrungen, Modellentwicklung
Anwendung	Modellnutzung	Benutzen	Modellnutzung	Ableitung von Vorhersagen
Evaluierung	Modellvergleich	Evaluieren	Modellevaluierung	Evaluierung der Konsistenz und Repräsentativität, Evaluierung der Prognosefähigkeit, Manipulation des natürlichen Systems, Datenerhebung
Revision	Modellrevision	Revidieren	Modellrevision	
Bezugnehmend und transformierend			Modellelaboration, Modellartikulation	
Metaebene				
Reflexiv und organisierend	Metamodellierungswissen, Metakognitives Wissen des Modellierungsprozesses		Modellbasierte Untersuchung	

gesamten Prozess hilfreich sind. Die Modellelaboration beschreibt die Fähigkeit zur Weiterentwicklung von Modellen und den Umgang mit dem Zusammenhang zwischen Modellen eines Gegenstands auf verschiedenen Maßstabsebenen. Diese Fähigkeit kann sowohl bei der Modellentwicklung als auch Evaluierung und Revision eine Rolle spielen, sie wird daher bei der Entwicklung der Stufung des Kompetenzmodells berücksichtigt. Die Modellartikulation beschreibt die Fähigkeit zwischen verschiedenen Darstellungsformen wechseln zu können und ist ebenfalls für die Stufung relevant. Die reflexive Metaebene wird z.T. ebenfalls als reflexiv organisierende Praktik aufgefasst (vgl. Papaevripidou 2014; Mislevy et al. 2017). Die Unterscheidung zwischen prozessorientiertem Vorgehen und reflexiver Metaebene wird nicht nur speziell in der didaktischen Forschung zum Modellieren (vgl. Schwarz et al. 2009; Papaevripidou et al. 2014), sondern auch allgemein in der Kompetenzforschung (vgl. Weinert 2001) als grundsätzlich begriffen. Es liegen umfassende Konzepte zum reflexiven Modellverständnis vor (z.B. Upmeyer zu Belzen & Krüger 2010), diese könnten ergänzend hinzugezogen werden, wenn das Zusammenspiel beider Bereiche untersucht werden sollte (vgl. Krüger et al. 2018; Krell et al. 2019). In dieser Arbeit wird darauf verzichtet das Metaverständnis als eine Praktik aufzunehmen, da sie Teil der Modellkompetenz ist und nicht der Modellierkompetenz.

Nachfolgend werden auf Grundlage geographiespezifischer Merkmale Schwierigkeitsstufen erarbeitet, die in der Zusammenführung mit den vier Praktiken als Dimensionen die Formulierung des Kompetenzmodells zulassen.

4 Drei Stufen geographischen Modellierens

Für die Modellierung von Raum werden in diesem Artikel die drei Basiskonzepte Struktur, Funktion, Prozess (vgl. DGfG 2017) als hierarchische Ebenen betrachtet. Die Wahrnehmung und Erfassung des Realraumes ist Fundament für die aufeinander aufbauenden Abstraktionen. Ausgehend von einer Ebene wird die darüber liegende modelliert (siehe. Abb. 3). Also erfolgt Modellieren im Übergang zwischen den Ebenen. Die Modelle der verschiedenen Ebenen beziehen sich dabei aufeinander, was die Fähigkeit der Modellelaboration nach Mislevy et al. erfordert, die das Herstellen von Zusammenhängen sich überschneidender Modelle (hier räumlicher) und die Ergänzung von generellen Modellen mit der Erkenntnis aus detaillierten Modellen beschreibt (vgl. Mislevy et al. 2017). Da die Objekte und ihre Funktionen der unteren Ebene für das Verhalten des Systems auf höherer

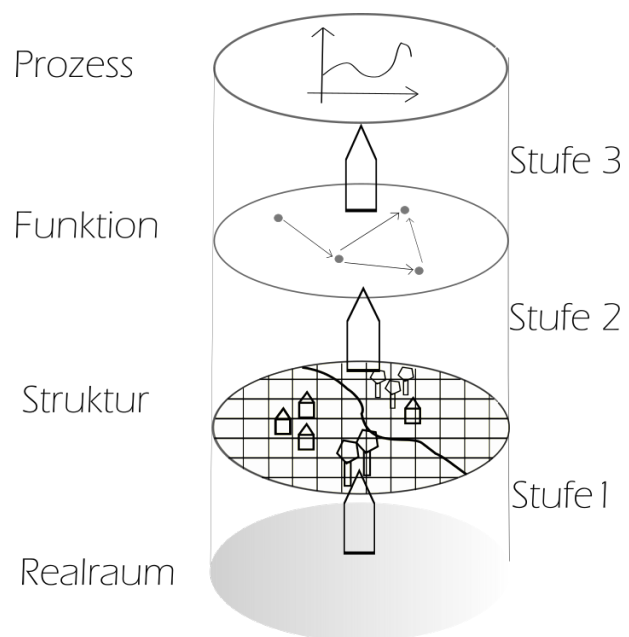


Abb. 3: Geographische Abstraktionsebenen (eigene Darstellung)

Ebene auf komplexe Weise verantwortlich sind, ist das Konzept *Scale*, das den Umgang mit verschiedenen Maßstabsebenen bezeichnet (Burt 2009; Lambert & Morgen 2010), hierbei von herausragender Bedeutung (vgl. O'Sullivan 2004; Goldstone & Wilensky 2008).

Die grundlegende Ebene ist der Realraum und die erste Stufe geographischen Modellierens ist die Erfassung der Struktur des Raumes (siehe Schritt 1 in Abb. 3). Die Komplexität des Realraumes wird durch eine homomorphe Abbildung reduziert, die den Realraum z.B. in einer Karte abbildet (vgl. Harvey 1969: 471). Das Modell des Realraumes gibt Auskunft über die Struktur seiner explizit abgebildeten Objekte. Ist der Raum derart erfasst, wird eine Analyse räumlicher Muster und Zusammenhänge möglich (vgl. Metoyer & Bednarz 2017), was eine Erklärung von Funktionen zulässt (vgl. Holt-Jensen 2018: 92), die in Stufe 2 modelliert werden (siehe Abb. 3). Die Modellierung kann in Modellobjekten, wie etwa Flowlinemaps, Wirkungsdiagrammen, Flow Charts oder mathematischen Gleichungen ausgedrückt werden. Die Modellierung des Raumes hinsichtlich Struktur und Funktion kann genutzt werden, um im dritten Schritt Prozesse im Raum zu modellieren (siehe Schritt 3 in Abb. 3) (vgl. O'Sullivan 2004). Hierfür können für den Schuleinsatz geeignete Simulationsprogramme z.B. netlogo (Wilensky 1999) Verwendung finden.

Die Ebenen werden in einem spiralförmigen Modellierprozess aufbauend durchlaufen (siehe Abb. 4). Aus der Anwendung der Modellierung der unteren Ebene ergibt sich der Modellentwurf der darüber liegenden. Essentiell ist dabei stets eine Reflexion über die Güte

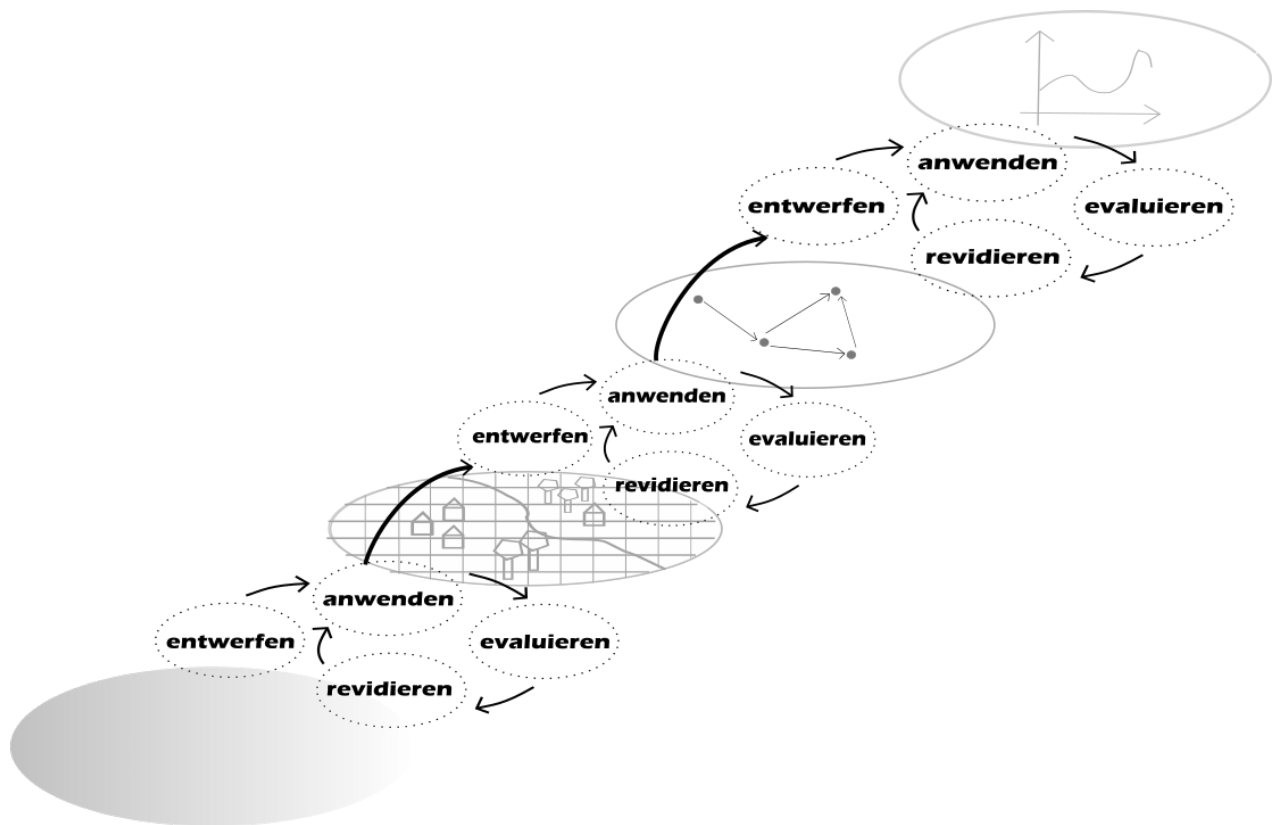


Abb. 4: Modellieren zwischen den Ebenen geographischer Abstraktion (eigene Darstellung)

und Tragweite der zugrunde gelegten Modelle (vgl. O'Sullivan 2004). Eine Kartenanalyse kann z. B. für den Entwurf eines Funktionsmodells genutzt werden. Dabei sollte die Güte und Intention der Karte reflektiert werden, da sie das auf ihr fußende Funktionsmodell beeinflusst. Dies gilt insbesondere auch dann, wenn nicht alle Ebenen spiralförmig durchlaufen werden, sondern sich der Modellzweck auf eine Ebene beschränkt und auf bestehenden Modellen aufgebaut wird. Evaluation und Revision sollten deswegen immer auch die darunterliegenden Ebenen mit einbeziehen.

Ein einfaches Beispiel der räumlichen Ausbreitung eines Waldbrandes soll diesen Prozess illustrieren (vgl. Wilensky 1997); Mithilfe des Modellierungsframeworks Netlogo wird die Ausbreitung eines Brandes in Abhängigkeit von der Dichte des Baumbestandes modelliert und kann dann simuliert werden. Hierzu muss zunächst der Wald auf der Strukturebene modelliert werden. Dafür wird die Fläche in gleich große quadratische Felder unterteilt, die entweder als Baumfeld oder als baumloses Feld definiert werden. Das Verhältnis zwischen baumlosen und baumbestandenen Feldern wird über die Baumdichte bestimmt und in der Standard-Einstellung wird die Verteilung als zufällig angenommen. Das Feuer wird an der linken Kante des Gesamtfeldes verortet und breitet sich von dort aus. Die Ausbreitung des Feuers wird als räumlich-

funktionaler Zusammenhang modelliert, indem das Feuer sich von Baumfeld zu Baumfeld, nicht jedoch über baumlose Felder hinweg ausbreiten kann. Dabei kann es sich in alle vier Himmelsrichtungen, d. h. im Modell über jede der vier Seiten des Baumfeldes, ausbreiten. Durch die Simulation des Modells wird der Prozess der Feuerausbreitung visualisiert. Dabei kann prognostiziert werden, ab welcher Baumdichte unter diesen Modellannahmen die gesamte Fläche abbrennen würde. Das Modell kann elaboriert werden, etwa indem Wind als Faktor hinzugenommen werden kann, dieser lässt das Feuer im Modell einzelne freie Felder überspringen und sorgt so für eine großflächigere Ausbreitung des Feuers, oder indem die Bäume nicht zufällig, sondern in festgelegten Mustern auf der Fläche verteilt werden. Die Anpassung des prädiktiven Simulationsmodells kann also durch eine Abänderung der darunterliegenden Ebenen erfolgen. Soll das Modell für einen konkreten Realraum genutzt werden, muss seine Gültigkeit für den Raum reflektiert werden und ggfs. müssen die Modellvorstellungen angepasst werden.

5 Geographische Modellierkompetenz

Aus den zusammengestellten Erkenntnissen zum Modellieren (siehe Tab. 1) und den geographischen Basis-

konzepten (s. Abb. 3) wird nun das Kompetenzmodell (siehe Tab. 2) abgeleitet. Integriert werden dazu die vier Praktiken, die die Strukturierung des Modells in Dimensionen ausmachen und die drei Stufen, die die Schwierigkeitsstufung definieren.

Da die Struktur von Modellen, z. B. in der Biologie (vgl. Krell et al. 2014), schwierigkeitsgenerierend im Umgang ist, erscheint es auch für die Geographie plausibel die Schwierigkeitslevel über die Struktur des erstellten Modells zu definieren. Die Struktur eines Modells lässt sich anhand von Zweckkategorien definieren. Das hat für den Prozess der Modellierung den Vorteil, dass das Schwierigkeitslevel einer Modellieraufgabe festgesetzt und nicht erst rückwirkend anhand des erstellten Modells das Niveau der zuvor erbrachten Leistung abgelesen werden kann. Der Modellzweck lässt sich danach kategorisieren, ob ein Modell illustriert bzw. repräsentiert, erklärt oder vorhersagt (vgl. Schwarz et al. 2009; Upmeyer zu Belzen & Krüger 2010; Oh & Oh 2011; Mislevy et al. 2017). Papaevripidou et al. (2014) nutzen das Vorhandensein dieser Kategorien im Endprodukt für die Bewertung von Modellierprozessen, indem sie diese als aufeinander aufbauende Ebenen begreifen (vgl. Papaevripidou et al. 2014). Die drei Zweckkategorien lassen sich mit den drei Stufen geographischen Modellierens parallelisieren: Auf unterer Ebene wird der Realraum in einem Modell repräsentiert und dabei illustriert. Werden räumliche Funktionen daraus abgeleitet, entsteht ein Modell, das erklären kann (= interpretative Ebene). Werden aus diesen funktionalen Zusammenhängen Prozesse modelliert, entsteht ein Modell, das vorhersagen kann. Das Schwierigkeitsniveau der Praktiken wird über die drei Ebenen hinweg als zunehmend angenommen, die im Kompetenzmodell die drei aufbauenden Schwierigkeitslevel ausbilden (siehe Tab. 2). Die Ausprägung der Schwierigkeit in der jeweiligen Modellierpraktik wird im Folgenden dargestellt.

Das **Entwerfen** eines Modells ist gleichbedeutend mit dem Formulieren von Hypothesen (vgl. Schwarz et al. 2009): für die Wahrnehmung eines Phänomens und

spontane Analogiebildung ist eine Eingrenzung und Konkretisierung des Modellgegenstandes (Targets) zwingend (vgl. Mislevy et al. 2017; Krell et al. 2019). Dafür muss eine passende Maßstabsebene und Betrachtungstiefe festgelegt werden (vgl. Mislevy et al. 2017). Im geographischen Kompetenzmodell finden diese Vorüberlegungen bei der Definition des Space, d. h. des Raumausschnittes und der Betrachtungsweise, statt. Die Kompetenzdimension des Modellentwerfens wird in drei Stufen strukturiert:

1. Ein einfaches Modell (Stufe 1) wird zur Repräsentation entwickelt (vgl. Schwarz et al. 2009; Papaevripidou et al. 2014; Mislevy et al. 2017), es werden hierfür die relevanten Objekte als Modell abgebildet (vgl. Papaevripidou et al. 2014; Mislevy et al. 2017).
2. Ein interpretatives Modell (Stufe 2) soll erklären können (vgl. Schwarz et al. 2009; Papaevripidou et al. 2014; Mislevy et al. 2017): es werden zusätzlich zu Objekten auch Funktionen abgebildet (Mislevy et al. 2017).
3. Ein elaboriertes Modell (Stufe 3) formuliert Prozesse und ist dadurch prognosefähig (vgl. Schwarz et al. 2009; Papaevripidou et al. 2014; Mislevy et al. 2017): es werden dafür Modelle der unteren Ebenen miteinander kombiniert, was eine Transformation der Darstellungsform und ein Erstellen von Zusammenhängen über unterschiedliche Modelle hinweg erforderlich macht (vgl. Mislevy et al. 2017).

Die **Anwendung** umfasst das sichere Bewegen im Raum des abstrakten Modells, was ein Durchdringen der verwendeten Symbolik einschließt und durch Vertrautheit mit dem Target des Modells erleichtert wird (vgl. Mislevy et al. 2017). Die Modellanwendung wird in drei Stufen strukturiert:

1. Niederschwellig (Stufe 1) bedeutet dies ein Modell zu nutzen, um etwas zu beschreiben (vgl. Schwarz et al. 2009; Papaevripidou et al. 2014).
2. Modelle werden auch genutzt (Stufe 2), um zu erklären (vgl. Papaevripidou et al. 2014; Schwarz et al. 2009; Mislevy et al. 2017) und

Tab. 2: Geographische Modellierkompetenz

		Entwerfen	Anwendung	Evaluation	Revision
1	Repräsentativ-Struktur	einen Space als Target definieren und daraus Komponenten in ein Raummodell abbilden	aus einem Modell Informationen über Lagebeziehungen auslesen	ein Modell durch Beobachtung und direkte Messung im Raum prüfen	das Modell durch Integrieren, Verschieben oder Streichen von Komponenten optimieren
2	Interpretativ-Funktion	räumlich funktionale Zusammenhänge zwischen den Komponenten in ein Modell abbilden	durch ein Modell argumentativ einen Zusammenhang erklären	Zusammenhänge in kontrollierter Umgebung oder durch Stichproben statistisch prüfen	funktionale Zusammenhänge optimieren
3	Prädiktiv-Prozess	räumliche Prozesse und Interaktionen in ein Modell abbilden	einen Simulationsprozess ausführen und Daten generieren	Grenzen eines Modells durch Variation der Simulation erproben	Zusammenstellung der zu Grunde liegenden Strukturen und Funktionen optimieren

3. (Stufe 3) um Vorhersagen abzuleiten (vgl. Schwarz et al. 2009; Papaevripidou et al. 2014; Mislevy et al. 2017; Krell et al. 2019) bzw. Daten zu generieren (vgl. Mislevy et al. 2017).

Um Vorhersagen ableiten zu können, bedarf es einer spezifischen Initialisierung des Modells (vgl. Krell et al. 2019). Schließlich ist die Anwendung von Modellen notwendig für die Konstruktion, Evaluation und Revision von Modellen (vgl. Mislevy et al. 2017), da durch die Anwendung die innere Konsistenz geprüft wird und Aussagen generiert werden, die auf ihre Richtigkeit bzgl. der modellierten Realwelt hin prüfen lassen.

Die **Evaluierung** bedeutet einen Vergleich zwischen dem Modell und empirischen Daten oder den Vergleich mit anderen Modellen sowie die Überprüfung der inneren Konsistenz (vgl. Schwarz et al. 2009; Mislevy 2018; Krell et al. 2019). Dieser Vergleich erfordert den Umgang mit einem Messmodell (vgl. Krüger et al. 2018). Es wird hier davon ausgegangen, dass die Schwierigkeit mit dem Abstraktionsgrad des Messmodells zunimmt. Drei Stufen strukturieren die Kompetenzdimension Modellevaluation:

1. Auf erster Stufe werden Modellkomponenten mit realweltlichen Referenzen verglichen (vgl. Mislevy et al. 2017), dies kann ausmessen, auszählen oder klassifizieren bzw. bestimmen im Gelände bedeuten.
2. Die Zusammenhänge der zweiten Stufe sind nicht direkt beobachtbar, jedoch können sie beobachtbare Phänomene bedingen (vgl. Mislevy et al. 2017; Krell et al. 2019). Zur Evaluierung von Zusammenhängen muss deshalb auf Experimente oder die Analyse von Stichproben zurückgegriffen werden (vgl. Krell et al. 2019). Durch statistische Messmodelle können Ergebnisse aus Experimenten und Stichprobenanalysen mit Modellaussagen unter Ausschluss von Zufallsergebnissen verglichen werden (vgl. Krüger et al. 2018).
3. Auf dritter Stufe ist die Gültigkeit von Simulationsmodellierungen zu beurteilen. Nach Oreskes et al. (1994) bleiben diese Modelle immer heuristisch, da es unmöglich ist Vorhersagekraft zu validieren. Geprüft werden können lediglich interne Konsistenz und Passung mit vergangenen Daten (vgl. O'Sullivan 2004) sowie ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit etablierten Modellen (vgl. Schwarz et al. 2009). Die Reflektion der zu Grunde liegenden Ebene ist somit auf dritter Ebene essentiell (vgl. O'Sullivan 2004).

In der **Revision** werden Erkenntnisse aus der Evaluierung in das Ausgangsmodell integriert (vgl. Schwarz et al. 2009; Mislevy et al. 2017). Dies kann ein Er-

weitern, Kürzen oder Umstrukturieren des Modells bedeuten und fordert sowohl ein gutes Verständnis des Ausgangsmodells mit seinen Grenzen, als auch der Erkenntnisse aus anderen Modellen und empirischen Untersuchungen und verlangt eine strenge Fokussierung auf den Zweck des Modells, d.h. das Modell darf nur beinhalten, was für den Zweck relevant ist (vgl. Schwarz 2009; Mislevy et al. 2017). Die Hauptschwierigkeit liegt in der Syntheseleistung. Drei Stufen strukturieren die Kompetenzdimension Modellrevision:

1. Auf der ersten Stufe werden hierzu Objekte gestrichen oder hinzugefügt, ggf. auch räumlich verschoben.
2. Auf der zweiten Stufe muss die erste Stufe mitbedacht werden, zusätzlich müssen die funktionalen Zusammenhänge optimiert werden.
3. Auf der dritten Stufe wird die Kombination der zu Grunde liegenden Strukturen und Funktionen überarbeitet.

6 Fazit

Durch Modellierung von Raum auf Ebenen aufeinander aufbauender Abstraktion lässt sich Komplexität mit Schüler/innen, methodisch kontrolliert, systematisch reduzieren. Das systematische und strukturierte Vorgehen ist geleitet durch einen iterativen, die drei Ebenen des Modellierens übergreifenden Prozess. Die jeweilige Ebene wird zyklisch modelliert, indem der erste Entwurf durch Anwendung und Evaluation geprüft und durch Revision verbessert wird. Bei höherer Abstraktionsebene sind die darunterliegenden Ebenen stets mit zu prüfen. Theoretisch kann ein perfektes Modell nicht erreicht werden. Eine zweckgerichtete Validität kann hingegen durch das vorgeschlagene Vorgehen ausreichend abgebildet werden. Dieses Verständnis von Modellierung ordnet sich in den systemwissenschaftlichen Zugang nach Bossel (2004) ein. Das Konzept baut damit auf der gleichen Grundlage auf, wie die verschiedenen Arbeiten zur Systemkompetenz (Viehrig et al. 2011; Rieß et al. 2015; Schuler et al. 2018; Brockmüller 2019) und ist an diese anchlussfähig. An die Arbeit von Viehrig et al. (2011) besteht durch eine analoge Stufe in der Dimension „Systeme erfassen und analysieren“ (vgl. Viehrig et al. 2011) besondere Anschlussfähigkeit.

Durch Modellierung von Raum auf Ebenen aufeinander aufbauender Abstraktion lässt sich Komplexität mit Schüler/innen, methodisch kontrolliert, systematisch reduzieren. Das systematische und strukturierte Vorgehen ist geleitet durch einen iterativen, die drei Ebenen des Modellierens übergreifenden Prozess. Die jeweilige Ebene wird zyklisch modelliert, indem der

erste Entwurf durch Anwendung und Evaluation geprüft und durch Revision verbessert wird. Bei höherer Abstraktionsebene sind die darunterliegenden Ebenen stets mit zu prüfen. Theoretisch kann ein perfektes Modell nicht erreicht werden. Eine zweckgerichtete Validität kann hingegen durch das vorgeschlagene Vorgehen zureichend abgebildet werden.

7 Literatur

- Baumfalk, B., D. Bhattacharya, T. Vo, C. Forbes, L. Zangori & C. Schwarz (2019): Impact of model-based science curriculum & instruction on elementary students' explanations for the hydrosphere. In: *Journal of Research in Science Teaching* 56(5). S. 570–597.
- Bette, J., M. Mehren & R. Mehren (2019): Modellkompetenz im Geographieunterricht. In: *Praxis Geographie* 3. S. 4–9.
- Bierema, A., C. Schwarz & J. Stoltzfus (2017): Engaging Undergraduate Biology Students in Scientific Modeling. Analysis of Group Interactions, Sense-Making, & Justification. In: *CBE—Life Sciences Education* 16(4). ar68. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29196429> (30.10.2019)
- Bossel, H. (2004): Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Books on Demand, Norderstedt.
- Brockmüller, S. (2019): Erfassung und Entwicklung von Systemkompetenz – Empirische Befunde zu Kompetenzstruktur und Förderbarkeit durch den Einsatz analoger und digitaler Modelle im Kontext raumwirksamer Mensch-Umwelt-Beziehungen. Unveröffentlichte Dissertationsschrift, Heidelberg.
- Brucker (2016): Geographiedidaktik in Übersichten. Friedrich-Verlag, Hallbergmoos.
- Burt, T. (2009): Scale: Resolution and Synthesis in Physical Geography. In: Clifford, N., S. Holloway, S. Rice & G. Valentine (Hrsg.): *Key Concepts in Geography*. Sage, Los Angeles.
- DGfG (2017): Bildungsstandards im Fach Geographie für den Mittleren Schulabschluss. Selbstverlag Deutsche Gesellschaft für Geographie, Bonn.
- Forbes, C., L. Zangori & C. Schwarz (2015): Empirical validation of integrated learning performances for hydrologic phenomena. 3rd-grade students' model-driven explanation-construction. In: *Journal of Research in Science Teaching* 52(7). S. 895–921.
- Goldstone, R. & U. Wilensky (2008): Promoting Transfer by Grounding Complex Systems Principles. In: *Journal of the Learning Sciences* 17(4). S. 465–516.
- Grünkorn, J. & D. Krüger (2012): Entwicklung und Evaluierung von Aufgaben im offenen Antwortformat zur empirischen Überprüfung eines Kompetenzmodells zur Modellkompetenz. In: Harms, U. & F. Bogner (Hrsg.): *Lehr- und Lernforschung in der Biologiedidaktik*. 5. „Didaktik der Biologie – Standortbestimmung und Perspektiven“, Internationale Tagung der Fachsektion Didaktik der Biologie im VBIO, Bayreuth 2011. Studien Verlag, Innsbruck. S. 9–27.
- Hartig, J. & E. Klieme (2006): Kompetenz und Kompetenzdiagnostik. In: Schweizer, K. (Hrsg.): *Leistung und Leistungsdiagnostik*. Springer, Heidelberg. S. 127–144.
- Harvey, D. (1969): *Explanation in Geography*. Arnold, London.
- Hokayem, H. & C. Schwarz (2014): Engaging fifth graders in scientific modeling to learn about evaporation & condensation. In: *International Journal of Science & Mathematics Education* 12(1). S. 49–72.
- Holt-Jensen, A. (2018): *Geography. History & Concepts*. 5. Aufl. Sage, London.
- Kauertz, A., H. Fischer, J. Mayer, E. Sumfleth & M. Walpuski (2010): Standardbezogene Kompetenzmodellierung in den Naturwissenschaften der Sekundarstufe I. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaft* 16. S. 135–153.
- Klieme, E. & D. Leutner (2006): Kompetenzmodelle zur Erfassung individueller Lernergebnisse und zur Bilanzierung von Bildungsprozessen. Beschreibung eines neu eingerichteten Schwerpunktprogramms der DFG. In: *Zeitschrift für Pädagogik* 6. S. 876–903.
- Krell M. & D. Krüger (2013): Wie werden Modelle im Biologieunterricht eingesetzt. In: *Erkenntnisweg Biologiedidaktik*. S. 9–26.
- Krell, M., A. Upmeyer zu Belzen & D. Krüger (2014): How year 7 to year 10 students categorize models: moving towards a student-based typology of biological models. In: Krüger, D. & M. Eklborg (Hrsg.): *Research in biological education*. Tagungsband der eridob, Berlin. S. 117–131.
- Krell, M., B. Reinisch & D. Krüger (2015): Analyzing Students' Understanding of Models & Modeling Referring to the Disciplines Biology, Chemistry, & Physics. In: *Research in Science Education* 45(3). S. 367–393.
- Krell, M., C. Walzer, S. Hergert & D. Krüger (2019): Development & Application of a Category System to Describe Pre-Service Science Teachers' Activities in the Process of Scientific Modelling. In: *Research in Science Education* 49(5). S. 1319–1345.
- Krüger, D., A. Kauertz & A. Upmeyer zu Belzen (2018): Modelle und das Modellieren in den Naturwissenschaften. In: Krüger, D., I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.): *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer, Berlin. S. 141–157.
- Lambert, D. & J. Morgan (2010): *Teaching Geography* 11–18. Open University Press, Berkshire.
- Louca, L., Z. Zacharia, M. Michalis & C. Constantinou (2011): Objects, Entities, Behaviors, & Interactions. A Typology of Student-Constructed Computer-Based Models of Physical Phenomena. In: *Journal of Educational Computing Research* 44(2). S. 173–201.
- Mahr, B. (2008): Ein Modell des Modellseins. Ein Beitrag zur Aufklärung des Modellbegriffs. In: Dirks, U. & E. Knobloch (Hrsg.): *Modelle*. Internationaler Verlag der Wissenschaften, Frankfurt (Main).

- Mayer, J. & N. Wellnitz (2014): Die Entwicklung von Kompetenzstrukturmodellen. In: Krüger, D., I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.): *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer, Berlin. S. 19–29.
- Mehren, M., R. Mehren, U. Röhl & C. Rosenberger (2015): Die doppelte Komplexität geographischer Themen – Eine lohnenswerte Herausforderung für Schüler und Lehrer. In: *Geographie aktuell & Schule* 37(216). S. 4–11.
- Mehren, R., A. Rempfler, E.-M. Ulrich-Riedhammer, J. Buchholz & J. Hartig (2015): Wie lässt sich Systemdenken messen? In: *Geographie aktuell & Schule* 215(37). S. 4–15.
- Mehren, R., A. Rempfler, E.-M. Ullrich-Riedhammer, J. Buchholz & J. Hartig (2016): Systemkompetenz im Geographieunterricht. Ein theoretisch hergeleitetes und empirisch überprüftes Kompetenzstrukturmodell. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 22(1). S. 147–163.
- Mehren, R., A. Rempfler, J. Buchholz, J. Hartig & E. M. Ulrich-Riedhammer (2018): System competence modeling: Theoretical foundation and empirical validation of a model involving natural, social and human-environment systems. In: *Journal of Research in Science Teaching* 55(685). S. 685–711.
- Metoyer, S. & R. Bednarz (2017): Spatial Thinking Assists Geographic Thinking. Evidence from a Study Exploring the Effects of Geospatial Technology. In: *Journal of Geography* 116(1). S. 20–33.
- Meyer, C. & D. Felzmann (2011): Was zeichnet ein gelungenes ethisches Urteil aus? – Ethische Urteilskompetenz im Geographieunterricht unter der Lupe. In: Meyer, C., R. Henry & G. Ströber (Hrsg.): *Geographische Bildung. Kompetenzen in didaktischer Forschung und Schulpraxis*. Tagungsband zum HGD-Symposium. Westermann, Braunschweig. S. 130–156.
- Mislevy, R., G. Haertel, M. Risconscente, D. Rutstein & C. Ziker (2017): *Assessing Model-Based Reasoning using Evidence-Centred Design*. Springer, Cham.
- Nicolaou, C. & C. Constantinou (2014): Assessment of the modeling competence. A systematic review & synthesis of empirical research. In: *Educational Research Review* 13. S. 52–73.
- Oh, P. & S. Oh (2011): What Teachers of Science Need to Know about Models. An overview. In: *International Journal of Science Education* 33(8). S. 1109–1130.
- Oreskes, N., K. Shrader-Frechette & K. Belitz (1994): Verification, Validation, & Confirmation of Numerical Models in Earth Science. In: *Science* 263(5147). S. 641–646.
- O’Sullivan, D. (2004): Complexity science & human geography. In: *Transactions of the Institute of British Geographers* 29. S. 282–295.
- Otto, K.-H. & L. Mönter (Hrsg.) (2015): *Experimente und Modelle (Themenheft)*. In: *Geographie heute* 36(322), Seelze.
- Papaevripidou, M., C. Constantinou & Z. Zacharia (2007): Modeling complex marine ecosystems. An investigation of two teaching approaches with fifth graders. In: *Journal of Computer Assisted Learning* 23(2). S. 145–157.
- Papaevripidou, M., C. Nicolaou & C. Contantiniou (2014): On Defining & Assessing Learners’ Modeling Competence in Science Teaching and Learning. Paper at the annual meeting of American Educational Research Association (AERA) 2014, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- Papaevripidou, M. & Z. Zacharia (2015): Examining how students’ knowledge of the subject domain affects their process of modeling in a computer programming environment. In: *Journal of computers in education* 2(3, SI). S. 251–282.
- Peter, C. (2018): Modelle. In: Brucker, A., J.-B. Haversath & A. Schöps (Hrsg.): *Geographie-Unterricht*. 102 Stichwort. Schneider Verlag, Hohengehren. S. 151–152.
- Raschke, N. (2018): Dreidimensionale Modelle. In: Brucker, A., J.-B. Haversath & A. Schöps (Hrsg.): *Geographie-Unterricht*. 102 Stichwort. Schneider Verlag, Hohengehren. S. 49–51.
- Rieß, W., S. Schuler & C. Hörsch (2015): Wie lässt sich systemisches Denken vermitteln und fördern? Theoretische Grundlagen und praktische Umsetzung am Beispiel eines Seminars für Lehramtsstudierende. In: *Geographie aktuell & Schule* 37(215). S. 16–29.
- Rivett, P. (1972): *Principles of Model Building. The Construction of Models for Decision Analysis*. Wiley, London.
- Schuler, S., D. Fanta, F. Rosenkraenzer & W. Riess (2018): Systems thinking within the scope of education for sustainable development (ESD) – a heuristic competence model as a basis for (science) teacher education. In: *Journal of Geography in Higher Education* 42(2). S. 192–204.
- Schwarz, C. & Y. Gwekwerere (2007): Using a guided inquiry & modeling instructional framework (EIMA) to support preservice K-8 science teaching. In: *Science Education* 91(1). S. 158–186.
- Schwarz, C. (2009): Developing Preservice Elementary Teachers’ Knowledge & Practices Through Modeling-Centered Scientific Inquiry. In: *Science Education* 93(4). S. 720–744.
- Schwarz, C., B. Reiser, E. Davis, L. Kenyon, A. Achér & D. Fortus (2009): Developing a learning progression for scientific modeling. Making scientific modeling accessible & meaningful for learners. In: *Journal of Research in Science Teaching* 46(6). S. 632–654.
- Stachowiak, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Springer, Wien.
- Tsivitanidou, O., C. Constantinou, P. Labudde, S. Rönnebeck & M. Ropohl (2018): Reciprocal peer assessment as a learning tool for secondary school students in modeling-based learning. In: *European Journal of Psychology of Education* 33(1). S. 51–73.
- Uhlenwinkel, A. (2018): Geographical Thinking: Is it a Limitation or Powerful Thinking? In: Brooks, C., M. Fargher & G. Butt (Hrsg.): *The Power of Geographical Thinking*. Springer, London. S. 41–53.

- Upmeyer zu Belzen, A. & D. Krüger (2010): Modellkompetenz im Biologieunterricht. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaft 16. S. 41–57.
- Upmeyer zu Belzen, A., D. Krüger & J. van Driel (Hrsg.) (2019): Towards a Competence-Based View on Models and Modeling in Science Education. Springer. (In Druck)
- Viehrig, K., S. Greiff, S. Alexander & J. Funke (2011): Geographische Kompetenzen fördern – Erfassung der Geographischen Systemkompetenz als Grundlage zur Bewertung der Kompetenzentwicklung. In: Meyer, C., R. Henry & G. Stöber (Hrsg.): Geographische Bildung. Kompetenzen in didaktischer Forschung und Schulpraxis. Westermann, Braunschweig S. 49–57.
- Viehrig, K., A. Siegmund, J. Funke, S. Wüstenberg & S. Greiff (2017): The heidelberg inventory of geographic system competency model. In: Leutner, D., J. Fleischer, J. Grünkorn & E. Klieme (Hrsg.): Competence Assessment in Education. Research, Models and Instruments. Springer, Heidelberg, S. 31–53.
- Weinert, F. (2001): Concept of Competence: A Conceptual Clarification. In: Rychen, D. & L. Salganik (Hrsg.): Defining & Selecting Key Competencies. Hogrefe, Seattle. S. 45–65.
- Wiktorin, D. (2013): Graphische Modelle im Geographieunterricht. Handlungsorientierter Einsatz von und kritischer Umgang mit Modellen. In: Praxis Geographie 12. S. 4–8.
- Wiktorin, D. (2014): Modelle in der Geographie: Vernetzt denken, kritisch reflektieren, kompetent anwenden. In: Praxis Geographie extra. S. 6–10.
- Wilensky, U. (1997): NetLogo Fire model: Center for Connected Learning & Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Fire> (15.07.2019)
- Wilensky, Uri (1999): NetLogo: Center for Connected Learning & Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (15.07.2019)
- Wirth, E. (1979): Theoretische Geographie. Springer, Wiesbaden.
- Zangori, L., T. Vo, C. Forbes & C. Schwarz (2017): Supporting 3rd-grade students model-based explanations about groundwater. A quasi-experimental study of a curricular intervention. In: International Journal of Science Education 39(11). S. 1421–1442.