

## Tipping Points – Schlüssel zum tiefgründigen Verständnis komplexer dynamischer Systeme bei Lernenden?

**Tipping Points – Key to a Deep Understanding of Complex Dynamic Systems by Learners?**

**Puntos de inflexión – ¿Clave para una comprensión profunda de los sistemas dinámicos complejos por parte de los estudiantes?**

Janis Fögele , Rainer Mehren, Armin Rempfler  

**Zusammenfassung** Das empirisch bestätigte GeoSysKo-Kompetenzmodell zur geographischen Systemkompetenz orientiert sich primär an quantitativen Systemmerkmalen. Qualitative Eigenschaften, die aus systemtheoretischer Sicht wichtiger für das tiefgründige Verständnis komplexer dynamischer Systeme sind, werden zu wenig berücksichtigt. Die neueren fachwissenschaftlichen Studien zu Tipping Points bedeuten eine fundamentale Erkenntniserweiterung im Funktions- und Prozessverständnis von Natur-, Sozial- und Mensch-Umweltsystemen. Ihre Aufarbeitung im vorliegenden Beitrag bildet die Grundlage, um daraus theoretisch und empirisch fundierte Systemeigenschaften abzuleiten, deren Operationalisierung die Erfassung eines qualitativen Systemverständnisses bei Lernenden ermöglichen bzw. verbessern soll. Eine entsprechende Erweiterung des GeoSysKo-Modells könnte einen starken Impuls in der empirischen Lehr-/Lernforschung zum Systemdenken in der Geographiedidaktik und darüber hinaus setzen.

**Schlüsselwörter** Systemisches Denken, Kompetenzmodellierung, Tipping Points, systemspezifische Eigenschaften

**Abstract** The empirically confirmed GeoSysKo-model for geographical system competence is primarily oriented towards quantitative system properties. Qualitative characteristics, which are more important for the profound understanding of complex dynamic systems from a systems theory perspective, are not sufficiently considered. The more recent studies on tipping points represent a fundamental expansion of knowledge in the functional and process understanding of natural, social and human-environmental systems. Their analysis in this paper forms the basis for deriving theoretically and empirically founded system properties, the operationalization of which should enable or improve the acquisition of a qualitative understanding of systems by learners. A corresponding extension of the GeoSysKo-model could provide a strong impulse in empirical teaching/learning research on systems thinking in Geography Education and beyond.

**Keywords** systems thinking, competence modelling, tipping points, system-specific properties

**Resumen** El modelo GeoSysKo, empíricamente confirmado para la competencia en sistemas geográficos, está orientado, principalmente, a las propiedades cuantitativas de los sistemas. Las características cualitativas, que son más importantes para la comprensión profunda de los sistemas dinámicos complejos desde la perspectiva de la teoría de sistemas no se consideran suficientemente. Los estudios más recientes sobre los puntos de inflexión señalan una expansión fundamental del conocimiento en la comprensión funcional y de procesos de los sistemas naturales, sociales y humano-ambientales. Su análisis en el presente documento constituye la base para derivar propiedades de los sistemas con fundamento teórico y empírico, cuya puesta en práctica debería permitir la adquisición de una comprensión cualitativa de los sistemas por parte de los estudiantes. Una ampliación del modelo GeoSysKo podría impulsar la investigación empírica de enseñanza/aprendizaje sobre el pensamiento sistémico en la enseñanza de la geografía.

**Palabras clave** pensamiento sistémico, modelización de competencias, puntos de inflexión, propiedades específicas de los sistemas

## 1. Einleitung

Als übergeordnetes konstitutives Merkmal von Systemen gilt Komplexität, auch wenn eine breit anerkannte Definition aufgrund vielfältiger Komplexitätstheoretischer Forschungsansätze nach wie vor aussteht (u.a. [HMELO-SILVER & AZEVEDO 2006](#); [LIETZ 2008](#); [MITCHELL 2009](#)). [RATTER und TREILING \(2008, S. 28–30\)](#) verweisen diesbezüglich auf die Notwendigkeit, zwischen einer quantitativ ausgerichteten Strukturkomplexität und einer qualitativ ausgerichteten Verhaltenskomplexität von Systemen zu unterscheiden. Der steigenden Anzahl an Elementen und Relationen werden demnach Systemeigenschaften gegenübergestellt, die über nicht-lineare Prozesse zum emergenten Verhalten führen. Verhaltenskomplexe Systeme zeichnen sich entsprechend durch eine intensive Prozessualität aus. Nach diesem Verständnis ist ein System nicht komplex, weil es über einen besonders hohen Grad der Vernetzung verfügt, sondern weil es sich komplex verhält, also bestimmte systemspezifische Eigenschaften aufweist. Die qualitativen Merkmale sind demnach von zentraler Bedeutung. Sie spielen daher auch eine wesentliche Rolle bei der Messung der Systemkompetenz.

Im Rahmen der GeoSysKo-Studie, bei der ein Kompetenzmodell zur geographischen Systemkompetenz entwickelt wurde, lagen der Niveaustufung drei schwierigkeitsgenerierende Merkmale zugrunde, die über alle drei (supponierten) Dimensionen und Stufen hinweg angewandt wurden ([MEHREN ET AL. 2015, 2016, 2018](#)):

- (1) Anzahl der Elemente und Relationen (niedrig, mittel, hoch),
- (2) Vernetzungsgrad (monokausal, linear, komplex) sowie
- (3) systemspezifische Eigenschaften (wie Nichtlinearität, Emergenz, eingeschränkte Vorhersagbarkeit; vgl. [Fig. 1](#)).

Bei den ersten beiden handelt es sich um quantitativ ausgerichtete Merkmale, nur beim letzten um ein qualitatives. Die Erfassung dieses dritten Merkmals zeigt im GeoSysKo-Projekt Schwächen. Die systemspezifischen Eigenschaften werden im empirisch überprüften Modell ([Fig. 1](#)) teilweise unpräzise ausgewiesen. Auf der ersten Kompetenzstufe wird z.B. allge-

mein von einem „schwach entwickelten Funktions- und Prozessverständnis“ gesprochen. Die auf den höheren Stufen konkretisierten Systemeigenschaften wie Parallel- und Rückkoppelungen, Emergenz etc. dienen vor allem der exemplarischen Illustration des Modells. In der GeoSysKo-Studie wurde zwar zunächst ein sehr ausführliches Theoriemodell entwickelt ([REMPFLER & UPHUES 2011, S. 23](#)), aufgrund des damaligen insbesondere empirisch schwachen Erkenntnisstandes eine trennscharfe Item-Entwicklung der hochaufgelösten Teildimensionen aber als nicht möglich erachtet. Entsprechend wurden die Teildimensionen zu einem vereinfachten dreidimensionalen Modell zusammengeführt und als Ausgangslage für die empirische Überprüfung verwendet. Das heißt, die Testaufgaben wurden im Sinne eines Gesamtkonstrukts/Globalwerts „systemspezifische Eigenschaften“ in Bezug auf die drei (supponierten) Kompetenzdimensionen entwickelt und psychometrisch überprüft, die Kompetenzen der Schülerinnen und Schüler somit nicht aufgefächert hinsichtlich konkreter systemspezifischer Teileigenschaften wie Nichtlinearität, Irreversibilität, eingeschränkte Vorhersagbarkeit etc. erhoben ([MEHREN ET AL. 2016, 2018](#)). Angesichts der neuen Erkenntnisse im Zusammenhang mit den Tipping Points hat sich die Ausgangslage zur Testentwicklung verändert, sodass eine weitere Präzisierung des Kompetenzmodells mittels systemspezifischer Eigenschaften hinsichtlich Stufung und Dimensionierung möglich erscheint.

Das Vorgehen in GeoSysKo entspricht dem Ansatz der meisten (inter-)nationalen Studien. Nur ganz wenige Untersuchungen haben zumindest bestimmte systemspezifischen Eigenschaften (z.B. Dynamik oder Rückkoppelungen) in Testaufgaben ausdifferenziert (s. Kap. 4). Ob diese Aufgabeneigenschaften jedoch auch mit differenzierbaren Personeneigenschaften/Teilkompetenzen einhergehen oder die verschiedenen Aufgaben de facto das Gleiche messen, ist bislang ein zentrales Forschungsdesiderat. Dabei gibt es Anhaltspunkte, dass die Ausdifferenzierung von Aufgabenformaten zur Testung systemspezifischer Eigenschaften sinnvoll ist und weitere Varianz aufklärt. [RUIZ-PRIMO ET AL.](#)

(2001) und YIN ET AL. (2005) haben im Kontext von Concept Map-Aufgaben empirisch erste Hinweise generiert, dass unterschiedliche Varianten des Aufgabenformats nicht die gleichen Informationen über das Systemverständnis der Probanden liefern. Ihre (bislang unbelegte) Vermutung ist, dass die eingesetzten unterschiedlichen Aufgabenformate unterschiedliche Systemeigenschaften adressierten.

Die folgenden Kapitel zeigen Möglichkeiten auf, wie eine Erweiterung des bestehenden GeoSysKo-Modells mit qualitativen Systemeigenschaften empirisch angegangen werden

kann. Zunächst wird das aktuelle GeoSysKo-Modell vorgestellt (Kap. 2), sodann der fachwissenschaftliche Forschungsstand über Tipping Points aufgearbeitet (Kap. 3.1), um daraus theoretisch und empirisch belegte Systemeigenschaften abzuleiten und deren vorläufige Beziehung zum GeoSysKo-Modell darzulegen (Kap. 3.2) sowie exemplarisch in Testaufgaben zu operationalisieren (Kap. 3.3). Schließlich wird der Forschungsstand über die verschiedenen Aufgabenformate dargelegt, die zur Testung systemspezifischer Eigenschaften infrage kommen (Kap. 4).

## 2. GeoSysKo-Systemkompetenzmodell

Zentral in Bezug auf geographische Bildung ist es, natürliche und gesellschaftliche (Sub-)Systeme in ihrer Wechselwirkung zu betrachten (DGfG 2020). Entsprechend bedarf es der theoretischen Fundierung eines Systemverständnisses, das den Besonderheiten der Verschränkung natürlicher und sozialer Systeme gerecht wird. Das hier vertretene Systemverständnis (ausführlich in REMPFLE & UPHUES 2010) orientiert sich an der *Sozialen Ökologie*, welche die Dichotomie zwischen Natur- und Sozialsystemen zu überwinden versucht, indem das Wirkungsgefüge Gesellschaft-Natur in seinem Gesamtzusammenhang als System betrachtet wird (HUMMEL ET AL. 2017). Die epistemologische Alternative, Gesellschaft und Natur als je eigenständige (Sub-)Systeme zu interpretieren, die über äußere Beziehungen miteinander gekoppelt sind, berücksichtigen wiederholt Forschungsarbeiten, die sich eng entlang der eigenen Fachsystematik ausrichten. Dabei werden häufig von den Naturwissenschaften und deren Didaktiken die sozialen Einflüsse bzw. von den Sozialwissenschaften die naturbürtigen Einflüsse als äußere Störungen des untersuchten Systems aufgefasst, wodurch diese Konzeption an ihre Grenzen stößt (REMPFLE & UPHUES 2010). Eine integrative Mensch-Umwelt-Systembetrachtung stellt somit den wesentlichen Unterschied zur (bisher) rein naturwissenschaftlich ausgerichteten Earth System Science Education dar (FINLEY ET AL. 2011; ORION & LIBARKIN 2014).

Unter Systemkompetenz im sozialökologischen Sinn kann die Fähigkeit und Fertigkeit verstanden werden, einen komplexen Wirklichkeitsbereich verschränkter sozialer und natürli-

cher Prägung unterschiedlicher Maßstabgröße in seiner Organisation und seinem Verhalten als System zu erkennen, zu beschreiben und zu modellieren sowie auf der Basis dieser Modellierung Prognosen und Maßnahmen zur Systemnutzung und -regulation zu treffen (MEHREN ET AL. 2016). Aus der Analyse des Systemverständnisses der Sozialen Ökologie und den bereits vorliegenden Ansätzen von Systemkompetenzmodellen in der Literatur (u.a. OSSIMITZ 1994; SOMMER 2005; BEN-ZVI ASSARAF & ORION 2005; HMELO-SILVER ET AL. 2007; VIEHRIG ET AL. 2017) wurde ein normatives, zunächst dreidimensionales (1. Systemorganisation, 2. Systemverhalten, 3. Systemadäquate Handlungsintention) Kompetenzstufenmodell entwickelt, welches im Rahmen des GeoSysKo-Projekts empirisch überprüft und in der zweidimensionalen Form (Verschmelzung der ersten beiden Dimensionen, vgl. Fig. 1) bestätigt wurde. Zur Analyse der Faktorstruktur wurden insgesamt drei Item-Response-Modelle geschätzt (ein-, zwei- und dreidimensional) und anhand gängiger Modellgüte-Maße verglichen. Das ein- und das zweidimensionale Modell lagen in ihrer Güte eng beieinander, sodass die Entscheidung für zwei Dimensionen stärker unter fachdidaktischen Gesichtspunkten (= 2D-Modell streicht deutlicher die Förderaspekte der Systemkompetenz für die Praxis hervor) und weniger unter psychometrischen Aspekten (= Schlankheit des Messinstruments) getroffen wurde. Regressionsanalysen zur Vorhersage der Itemschwierigkeiten haben die Niveaustufen empirisch bestätigt (MEHREN ET AL. 2018).

	<b>Systemorganisation und Systemverhalten</b> <b>Systemische Struktur, Grenze, Emergenz, Interaktion &amp; Dynamik</b> <i>= Fähigkeit, einen komplexen Wirklichkeitsbereich in seiner Struktur und seinem Verhalten als System zu erkennen, zu beschreiben und zu modellieren</i>	<b>Systemadäquate Handlungsintention</b> <b>Systemische Prognose &amp; Regulation</b> <i>= Fähigkeit, auf der Basis der Modellierung Prognosen und Maßnahmen zur Systemnutzung und -regulation zu treffen</i>
<b>Stufe 1</b>	a) Schüler identifiziert eine niedrige Anzahl an Elementen und Relationen b) überwiegend isoliert oder monokausal und als vage abgrenzbaren Beziehungszusammenhang. <b>c) Seine Analyse monokausaler Entwicklungsverläufe basiert auf einem schwach entwickelten Funktions-/Prozessverständnis.</b>	a) Schüler entwickelt bei einer niedrigen Anzahl an Elementen und Relationen b) Prognosen und regulative Maßnahmen aufgrund monokausaler Wirkungsanalyse, <b>c) vager Antizipation der Wirkung und schwach ausgeprägter Komplexitätsreduktion.</b>
<b>Stufe 2</b>	a) Schüler identifiziert eine mittlere Anzahl an Elementen und Relationen b) überwiegend linear und als mäßig abgrenzbaren Beziehungszusammenhang. <b>c) Seine Analyse linearer Entwicklungsverläufe basiert auf dem Verständnis von Wechselbeziehungen, Reihen- und Parallelkoppelungen sowie einfachen Haushaltsbeziehungen.</b>	a) Schüler entwickelt bei einer mittleren Anzahl an Elementen und Relationen b) Prognosen und regulative Maßnahmen aufgrund linearer Wirkungsanalyse, <b>c) Antizipation der Wirkung und mäßig ausgeprägter Komplexitätsreduktion.</b>
<b>Stufe 3</b>	a) Schüler identifiziert eine hohe Anzahl an Elementen und Relationen b) überwiegend komplex und als eindeutig abgrenzbaren Beziehungszusammenhang sowie als Teil verschachtelter Systeme. <b>c) Seine Analyse linearer und nicht linearer Entwicklungsverläufe basiert auf dem Verständnis von Rückkoppelungen und Kreisläufen sowie anspruchsvollen Haushaltsbeziehungen, Irreversibilität und Emergenz.</b>	a) Schüler entwickelt bei einer hohen Anzahl an Elementen und Relationen b) Prognosen und regulative Maßnahmen aufgrund komplexer Wirkungsanalyse, <b>c) Antizipation der Wirkung und stark ausgeprägter Komplexitätsreduktion sowie mit dem Bewusstsein eingeschränkter Vorhersagbarkeit.</b>

**Fig. 1.** Empirisch überprüfbares Kompetenzmodell mit den schwierigkeitsgenerierenden Merkmalen (a) Anzahl der Elemente & Relationen, (b) Vernetzungsgrad, (c) systemspezifische Eigenschaften (MEHREN ET AL. 2015; 2018).

### 3. Tipping Points (TP)

Bei Tipping Points (= Kippunkte) handelt es sich um ein übergeordnetes Systemphänomen, das seit rund 20 Jahren in den Fachwissenschaften wahrgenommen wird (Kap. 3.1). Kippunkte treten in allen Arten von komplexen Systemen auf, einschließlich des menschlichen Körpers und der menschlichen Gesellschaft. Entsprechend etabliert sind TP nicht nur in den Naturwissenschaften, insbesondere den Klima- und Erdsystemwissenschaften, sondern auch in den Geistes-/Sozialwissenschaften, namentlich in der Sozialökologie. Im Gegensatz zur systemtheoretisch (sowie z.T. fachdidaktisch und kognitionspsychologisch) ausgerichteten Literatur, die für die in der GeoSysKo-Studie betriebenen Modellent-

wicklung hauptsächlich verwendet wurde, liegen nun empirisch fundierte und breit ausgeleitete fachwissenschaftliche Studien vor, die für weitere Arbeiten zwei Zwecken dienen sollen: (1) Aus ihnen lassen sich qualitative Systemeigenschaften ableiten (Kap. 3.2), die theoretisch und insbesondere empirisch belegt sind. Der konkrete inhaltliche Fachbezug verspricht die Herleitung von Eigenschaften, die sich auf einem ähnlichen Abstraktionsniveau bewegen und entsprechend operationalisierbar sein dürften. (2) Dank ihrer ausführlichen Dokumentation und häufigen inhaltlichen Nähe der Studien zur Geographie lassen sie sich, so die Arbeitshypothese, für die Entwicklung geographisch relevanter und trennschar-

fer Testitems vielversprechend nutzen. Erste Aufgabenbeispiele dazu liegen vor (Kap. 3.3).

### 3.1 Erkenntnisstand in den Fachwissenschaften

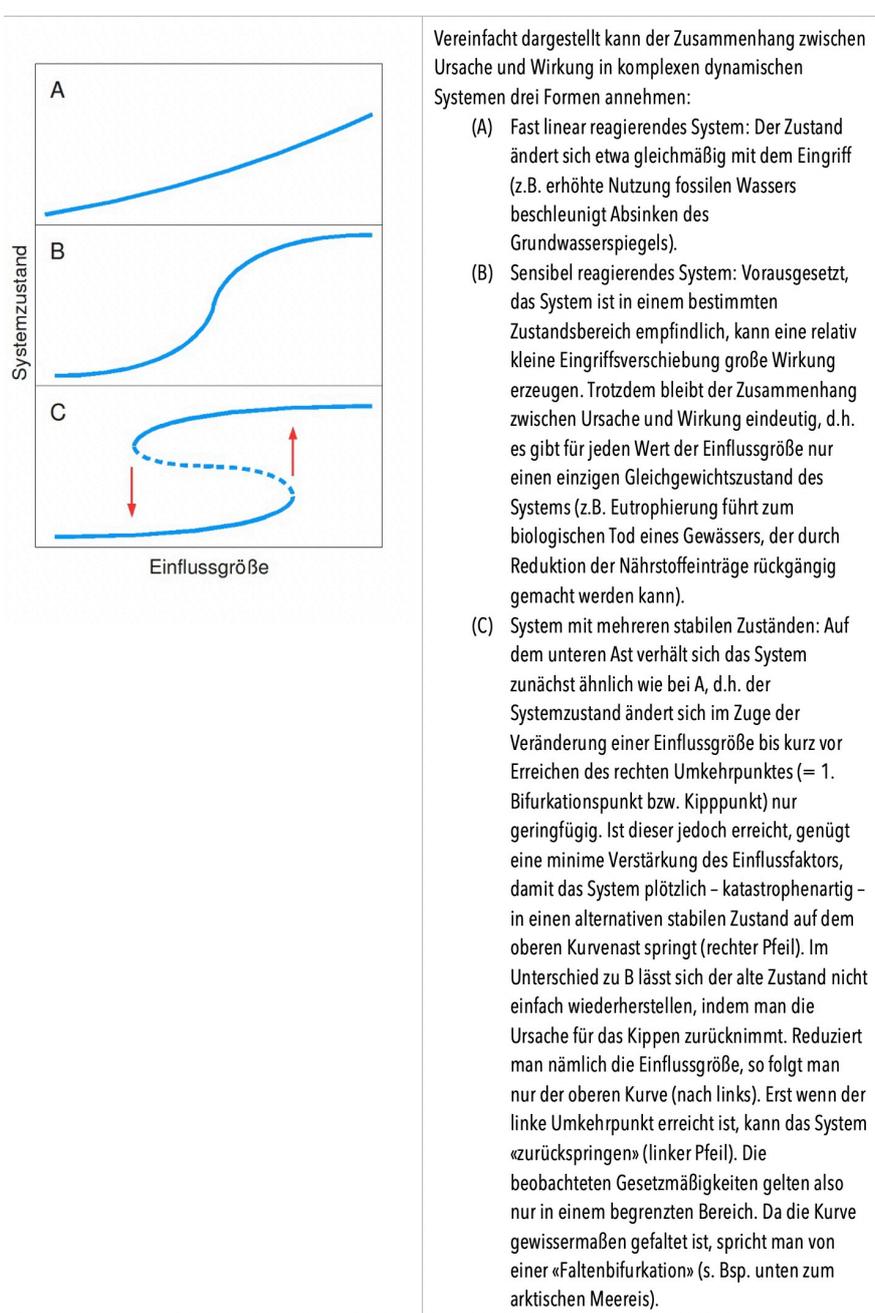
Fachwissenschaftlich relevant brachte Schellnhuber (vgl. SMITH ET AL. 2001, S. 946) den ursprünglich soziologisch geprägten Begriff erstmals um 2000 in die Klimawissenschaften ein, indem er aufbauend auf seinen Arbeiten zur nichtlinearen Dynamik im dritten IPCC-Sachstandsbericht auf die vernachlässigte Möglichkeit diskontinuierlicher, irreversibler und extremer Ereignisse im Rahmen der globalen Erwärmung verwies. Bis dahin ging man primär von linearen, allmählich stattfindenden Veränderungen aus. *Großräumige Diskontinuitäten* im Klimasystem galten zu dieser Zeit allerdings nur bei einer Erderwärmung von 5°C über dem vorindustriellen Niveau als wahrscheinlich (LENTON ET AL. 2019). Spätestens mit *Tipping Elements in the Earth's Climate System* (LENTON ET AL. 2008), einem der in den Folgejahren am häufigsten zitierten geowissenschaftlichen Beiträge, verschob sich die Verwendung des TP Konzepts von einer eher marginalisierten Position in den Mainstream der Klimawissenschaften (KERR 2008). Nach Auffassung der Erdsystemwissenschaften spielten TP eine Schlüsselrolle bei der Schaffung des modernen Erdsystems, in dem sich der Mensch entwickeln konnte, und das Kippverhalten der Vergangenheit lässt auf Systeme schließen, in denen zukünftig TP auftreten könnten. TP bewegen sich auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen (LENTON 2013) und man geht davon aus, dass insbesondere Systeme, bei denen bestimmte Treiber (z.B. die globale Mitteltemperatur) über kritische Grenzen hinaus belastet werden, Kandidaten für TP sind. An der Schwelle zum *Kippen* können kleine zusätzliche Störungen zu einer unverhältnismäßigen und weitreichenden Reaktion des Systems führen (KRIEGLER ET AL. 2009). Es kommt zu abrupten und nichtlinearen Veränderungen, die, bezogen auf eine menschliche Zeitskala, irreversibel sein können (REID ET AL. 2010). REID ET AL. (2010) sowie LENTON (2013) mutmaßen allerdings, dass TP auch Chancen bergen, wenn sich dadurch die Beziehung zwischen menschlichen Gesellschaften und den Umweltsystemen positiv verändert (vgl. Bsp. unten zur Finnmark). Voraussetzung für einen TP

sind starke positive Rückkoppelungen in der inneren Dynamik eines Systems. Grundlegend für das Konzept sind die mathematische Theorie der Bifurkationen (POINCARÉ 1885) und die Katastrophentheorie (ZEEMAN 1976). Angenommen wird, dass Diskontinuitäten nicht von den Zustandsvariablen eines Systems abhängen, sondern von wenigen externen Kontrollparametern (bzw. Treibern). Überschreitet ein System einen sog. Bifurkationspunkt, geht es in einen alternativen stabilen Zustand über und es kommt zu einer qualitativen Veränderung der Systemdynamik (STROGATZ 1994). Bei der für TP bedeutsamen *Faltenbifurkation* (*fold bifurcation*) ändert sich der Systemzustand aufgrund der Veränderung einer Einflussgröße bis kurz vor Erreichen des Bifurkationspunkts nur geringfügig (Fig. 2). Kleine zusätzliche Veränderungen der Einflussgröße hingegen führen zum sprunghaften Übergang des Systems in einen alternativen stabilen Zustand (SCHEFFER ET AL. 2009; LENTON 2013). Das Konzept der TP fügt sich gut in die Theorie der Selbstorganisierten Kritikalität (SOC = *self-organized criticality*) ein, indem ein Kippunkt den präzisen Moment des Übergangs von einem Zustand in den nächsten beschreibt (BAK 1996).

Während TP sich auf die kritische Schwelle der qualitativen Systemveränderung beziehen, sind unter Tipping Elements (= Kippelemente) großräumige Bestandteile des Erdsystems (Subsysteme) zu verstehen, die einen TP überschreiten können (LENTON ET AL. 2008). Ein Beispiel ist das arktische Meereis, dessen Verlust zu den auffälligsten Anzeichen der Erderwärmung zählt und auf sich verstärkenden Rückkoppelungen beruht (NOTZ 2009). Insgesamt hat die Sommereisfläche seit Ende der 1970er Jahre jährlich um etwa 3,3% abgenommen, wofür v.a. die Eis-Albedo-Rückkopplung verantwortlich ist. Wenn Meereis schmilzt, wird die dunklere Wasseroberfläche sichtbar. Diese absorbiert mehr Sonnenstrahlung, wodurch sich Eisverlust und Erwärmung gegenseitig verstärken. Eine untergeordnete Rolle spielt die konvektive Wolkenrückkopplung, indem die über offenem Wasser erhöhte Wolkenbildung die nach unten gerichtete langwellige Strahlung verstärkt und ebenfalls dazu beiträgt, den Ozean eisfrei zu halten. Hinzu kommt die winterliche Eisbedeckung, bei der man von einer noch sprunghafteren Reaktion ausgeht. Sobald nämlich die relativ

einheitliche Wasseroberflächentemperatur im winterlichen arktischen Ozean den Gefrierpunkt überschreiten wird, dürfte sich das Eisgebiet sehr schnell massiv reduzieren. Modellrechnungen zeichnen einen abrupten Verlust des Wintermeereises an einem Bifurkationspunkt, also ein Szenario, das auf die Nicht-Umkehrbarkeit dieses Übergangs zu einer eisfreien Arktis hindeutet (BATHIANY ET AL. 2016a). In wenigen Jahrzehnten könnte sich daher ein neuer stabiler Zustand mit einer zumindest im Sommer eisfreien Arktis einstellen. Dies würde neue Handelsrouten und den Zugang zu Bodenschätzen ermöglichen. Gleichzeitig würde der Eisschwund das arktische Ökosystem grundlegend verändern und sich vermutlich

auf die atmosphärische Zirkulation auswirken, sodass in Europa veränderte Wetterlagen und Extremereignisse eintreten könnten (PIK 2008). Entgegen der ursprünglichen Vermutung des Kippens bei einer globalen Erwärmung von 5°C (über dem vorindustriellen Niveau; vgl. oben) deuten die beiden jüngsten IPCC-Sonderberichte (IPCC 2019a, 2019b) bereits bei 1-2°C globaler Erwärmung auf das Eintreten von TP (LENTON ET AL. 2019). Weitere von Schellnhuber und Kollegen (PIK 2008; LENTON ET AL. 2008) benannte potentielle Kippelemente sind: Grönländischer und Westantarktischer Eisschild, Borealwälder, Amazonas Regenwald, El Niño (Südliche Oszillation/EN-SO), Sahara/Sahel- und Westafrikanischer



**Fig. 2.** Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung in komplexen dynamischen Systemen (Quelle: BILDUNGSSERVER KLIMAWANDEL (2020) nach SCHEFFER ET AL. 2001, S. 592; SCHEFFER ET AL. 2009, S. 54; verändert).

Monsun, Indischer Sommermonsun, Thermohaline Atlantikzirkulation (= Atlantische Meridionale Umwälzzirkulation/AMOC). Nebst dem arktischen Meereis wird der grönländische Eisschild als besonders anfällig eingestuft, weil er immer schneller schmilzt (IPCC 2019b). Sollte eine bestimmte Schwelle überschritten werden, könnte der Meeresspiegel über Tausende von Jahren weitere 7m ansteigen. Modelle deuten auf das Erreichen dieser Schwelle bei einer globalen Erderwärmung von 1,5°C hin, was bereits 2030 geschehen könnte (IPCC 2019b; LENTON ET AL. 2019).

Gemäß LENTON ET AL. (2019) kann es zwischen Kippelementen zu Kaskadeneffekten (= *cascade of tipping points*) kommen, das heißt, das Auslösen eines TP in einem System erhöht die Kipp-Wahrscheinlichkeit für weitere (Sub-)Systeme. Damit einher geht das Risiko von Dominoeffekten und sich gegenseitig verstärkenden Rückkoppelungen (ROCHA ET AL. 2018). Am bedrohlichsten erachtet wird die Möglichkeit der Annäherung an eine globale Kaskade von Kippunkten, die zu einem neuen, weniger bewohnbaren *hothouse*-Klimazustand führen und somit eine existenzielle Bedrohung der Zivilisation bedeuten würde. So erhöht etwa die Erwärmung der Arktis und das Abschmelzen Grönlands den Zufluss von Süßwasser in den Nordatlantik. Dies könnte zu einer Verlangsamung der AMOC beitragen, die eine Schlüsselrolle im globalen Wärme- und Salztransport einnimmt. Kombiniert mit einem gesteigerten Abschmelzen des Grönlandeises könnte dies den westafrikanischen Monsun destabilisieren und eine Dürre in der Sahelregion auslösen, ebenso den Amazonas austrocknen und den Ostasien-Monsun stören usw. (LENTON ET AL. 2019; STEFFEN ET AL. 2020).

Viele dieser TP beziehen sich auf Systemdynamiken der Atmo-/Bio-/Kryo- und Hydrosphäre. Ebenso relevant sind TP bei anthropogeographischen Phänomenen. Seinen Ursprung hat der Begriff tatsächlich in den Geistes-/Sozialwissenschaften. In einem soziologischen Artikel über metropolitane Segregation beschreibt GRODZINS (1957) den Prozentsatz der nicht-weißen Einwohner in einem US-Stadtviertel, der einen *white flight* auslöst und sich dadurch das Viertel auf die vollständige Besetzung durch Nicht-Weiße umstellt (vgl. LENTON 2013). CENTOLA ET AL. (2018) konnten inzwischen die Existenz eines TP in der Dynamik sich ändernder sozialer Konventionen ex-

perimentell belegen. Demnach sind Minderheiten, die eine kritische Masse - d.h. eine für die Initiierung sozialer Veränderungen relevante Gruppengröße von ca. 25% - erreichen, in der Lage, ein etabliertes Verhalten umzukehren. Gemäß MILKOREIT ET AL. (2018) hat vor allem die Forschung über sozialökologische Systeme zur vielfältigen Verwendung der TP Konzeption beigetragen (z.B. FILATOVA ET AL. 2015; SUGIARTO ET AL. 2015). Einen Kippunkt im Vorfeld seines Auftretens zu identifizieren, ist schwierig. Einmal erreicht, verändert sich das System hingegen maßgeblich, was dokumentiert werden kann (WASSMANN & LENTON 2012; YOUNG 2012). Verschwinden bspw. in einem Ökosystem wichtige Arten, können neue invasive Arten die Zusammensetzung so sehr verändern, dass sich ein neuer stabiler Zustand einstellt. Solche Veränderungen sind selten reversibel, weil die Chance zur Rückkehr in den ursprünglichen Zustand gering ist. Aus sozialökologischer Sicht interessant ist die Frage, inwiefern Sozialsysteme sich an derart radikal veränderte Natursysteme anzupassen oder gar von solchen zu profitieren vermögen, selbst bei irreversibler Veränderung. Denn ein ursprünglich ressourcenbasiertes Sozialsystem muss sich nicht automatisch wiederherstellen, wie Beispiele zeigen, in denen eine Ökosystemkrise mit einer Privatisierung der Nutzungsrechte einherging und infolge nicht-lokale Akteure neu entstandene Ressourcen ausschöpften. BRODERSTAD und EYTHORSSON (2014) untersuchten von der Fischerei abhängige Sami-Gemeinden in der nordnorwegischen Finnmark. Die in diesen Fjordgebieten genutzten Ökosysteme veränderten sich in den letzten drei Jahrzehnten komplett, was zu einem neuen stabilen (Natur-)Systemzustand führte: Zusammenbruch der lokalen Fischbestände und Verarmung der Seetangwälder sowie Invasion durch neue Arten. Die Gemeinden reagierten schnell auf die ökologischen Herausforderungen, indem sie das Fischereimanagementsystem veränderten (u.a. Zuteilung größerer Fangquoten an offene Gruppen von Kleinfischern; Einführung von Fjordleinen zum Ausschluss großer Schiffe; Begünstigung ansässiger samischer Fischer). Die Änderungen kamen dank politischem Druck des Samen-Parlaments zustande, das auch finanziell zur Erneuerung der Fischerei beitrug. Dank dieser Unterstützung konnten sich die samischen Kleinfischer als marginalisierte Gruppe

allmählich über den norwegischen Fischerverband hinaus nationales politisches Gehör verschaffen. Als Fazit hält die Studie fest, dass eine irreversible Veränderung des Ökosystems positiv zur Reorganisation und Widerstandsfähigkeit der von der Fischerei abhängigen Gemeinschaften beigetragen hat. Nebst der sozialökologischen Dynamik auf lokaler Ebene verbindet sich diese Resilienz auch wesentlich mit der politischen Bereitschaft auf nationaler Ebene, die charakteristische Kleinfischerei in den Küstengebieten zu unterstützen. Die Frage, ob die Gemeinschaften bzw. die sozialökologischen Systeme, in die sie eingebettet sind, ohne diese politische Vertretung einen Wendepunkt hin zu einem neuen stabilen Zustand überschritten hätten, lassen die Autoren als Hypothese offen.

MILKOREIT ET AL. (2018) legen eine erste Metaanalyse vor, indem sie, basierend auf einem bibliometrischen Mixed-Method-Ansatz die zwischen 1960 und 2016 veröffentlichte Literatur aus allen Bereichen der Wissenschaft zu Kipppunkten und ähnlichen Konzepten (wie etwa Regimewechsel) analysierten. Das Autorenteam identifiziert 23 verschiedene Merkmale, die über alle Disziplinen hinweg zur Beschreibung von TP verwendet werden, ortet aber keine disziplinspezifischen Definitionen. Gestützt auf ein sozialökologisches Systemverständnis reduzieren die Autoren die acht am häufigsten verwendeten Merkmale aller Disziplinen auf vier ihrer Meinung nach notwendige Bedingungen:

- (a) Mehrere stabile Zustände (was ein bestimmtes Maß des Wandels und eine strukturelle Neukonfiguration des Systems impliziert),
- (b) Abruptheit (bzw. Nichtlinearität),
- (c) Rückkoppelungen (als systeminterne Treiber des Wandels zwischen zwei Systemzuständen und als Zustandsstabilisatoren) sowie
- (d) Irreversibilität (innerhalb einer für menschliche Gesellschaften relevanten Zeitskala).

Basierend auf diesen vier Mindestbedingungen schlagen MILKOREIT ET AL. (2018, S. 9) vor, dass ein TP generell als der Punkt oder die Schwelle definiert wird, an der kleine quantitative Veränderungen im System einen nichtlinearen Prozesswandel auslösen, der durch systeminterne Rückkopplungsmechanismen getrieben wird und unweigerlich zu einem

qualitativ anderen Zustand des Systems führt, der oft irreversibel ist. Dieser neue Zustand unterscheidet sich vom ursprünglichen durch seine fundamental veränderten (positiven und negativen) zustandsstabilisierenden Rückkoppelungen. Davon ausgehend, dass natürliche und soziale Systeme ontologisch ähnlich genug sind, um TP als mehr als nur eine konzeptuelle Metapher zu verwenden, betonen sie die Möglichkeit, mit dem selben mathematischen Konstrukt Natur- und Sozialsysteme wie auch Mensch-Umwelt-Systeme zu beschreiben.

Mit Blick auf eine nachhaltige Regulation fragiler Umweltsysteme stellt sich die Frage nach Indikatoren für TP. SCHEFFER ET AL. (2009) beziehen sich auf ein in der dynamischen Systemtheorie bekanntes Phänomen der *kritischen Verlangsamung* (WISSEL 1984). Sie verstehen darunter die Beobachtung, dass sich Systeme nahe an einem Kippunkt nur sehr langsam von Störungen erholen (vgl. auch SCHEFFER 2010; LENTON 2013). DAI ET AL. (2012) belegen mithilfe eines experimentell konstruierten Bifurkationsschemas, dass eine kritische Verlangsamung ein Frühwarnsignal für den Verlust der Widerstandsfähigkeit vor einer Faltenbifurkation liefern kann, die schließlich zu einem katastrophalen Systemzusammenbruch führt. Signale einer kritischen Verlangsamung auf der Grundlage von Zeitreihen erfordern allerdings Beobachtungen über eine lange Zeitspanne, die vor Ort oft schwer zu erhalten sind. BATHIANY ET AL. (2016b) stellen aufgrund ihrer Untersuchungen zum arktischen Meereis fest, dass der momentane Klimawandel in der Arktis zu schnell verläuft, als dass man bedeutsame Variabilitätsänderungen rechtzeitig diagnostizieren könnte. Sie schätzen deshalb die Möglichkeit, Frühwarnsignale vor einem abrupten Meereisverlust an einem Kipppunkt zu erkennen, als sehr beschränkt ein.

### 3.2 Ableitung systemspezifischer Eigenschaften aus Tipping Points

Betrachtet man die TP-Konzeption konsequent aus systemtheoretischer Sicht – die oben referenzierten Fachwissenschaftlerinnen und Fachwissenschaftler tun dies nur teilweise und oft implizit –, können daraus eine Reihe systemspezifischer Eigenschaften abgeleitet werden.

TP beschreibt ein zentrales qualitatives Merkmal komplexer Natur-, Sozial- und Mensch-Umwelt-Systeme, das sich grundsätzlich durch Dynamik auszeichnet. Diese ist nicht durch lineare Beziehungen bestimmt, sondern kann ein stark nichtlineares, manchmal irreversibles und abruptes Änderungsverhalten zeigen (MILKOREIT ET AL. 2018; STEFFEN ET AL. 2020). Des Weiteren hebt sie sich durch positive Rückkopplungen hervor. Wird ein Bifurkationspunkt überschritten, stellt sich – sprunghaft – ein alternativer stabiler Systemzustand ein, der mit einer qualitativen Veränderung der Systemdynamik einhergeht. Fundamental veränderte (ehemals) positive und negative Rückkoppelungen wirken nun stabilisierend. Die Fähigkeit zur Systemstabilisierung auf einem neuen Niveau lässt sich systemtheoretisch durch die Eigenschaft der Selbstorganisation erklären (LIETZ 2008; ELVERFELDT & EGNER 2015; STEPHAN 2016). Sie bedeutet, dass ein offenes System die Relationen zwischen einzelnen Elementen selbst herstellt, kontrolliert und reguliert, woraus eine spezifische, das System charakterisierende, Struktur hervorgeht. Grundlegende theoretische Überlegungen dazu finden sich mit Bezug auf Naturssysteme (NICOLIS & PRIGOGINE 1977) wie auch Sozialsysteme (LUHMANN 1984, 1988). Den Merkmalen der Selbstorganisation und Systemstabilisierung nahe steht das (eher übergeordnete) Konzept der Emergenz, wird doch durch einen TP der Zustand und die Entwicklung eines Systems qualitativ verändert. Es entstehen neue räumlich und zeitlich organisierte Strukturen und vor allem Eigenschaften, die komplexe Systeme als Folge von Selbstorganisationsprozessen hervorbringen und die sich nicht durch Merkmalskategorien der Einzelkomponenten beschreiben lassen (GILBERT & TROITZSCH 2005; LIETZ 2008; EGNER 2008; RATTER 2012; STEPHAN 2016). Die Vorhersagbarkeit von selbstorganisierenden Systemen wird in den oben genannten theoretischen Ansätzen wie auch in zahlreichen TP Studien pessimistisch beurteilt (SCHEFFER ET AL. 2009; SCHEFFER 2010; DAI ET AL. 2012; LENTON 2013; BATHIANY ET AL. 2016b), das Bewusstsein einer eingeschränkten Vorhersagbarkeit aber als zentral eingeschätzt. Bestätigt wird die Schwierigkeit einer Vorhersage auch von der Chaostheorie (NEWMAN 1996; STEPHAN 2016, S. 245). Zwar mögen Steuerungsversuche zu Veränderungen führen, ob diese aber die beabsichtigte Wirkung zeigen oder völlig unerwartete Ergebnisse produzie-

ren, hängt wesentlich von der Selbstorganisation des betreffenden Systems ab. Auch mit der Kenntnis sämtlicher Komponenteneigenschaften bleibt es aufgrund seines nichtlinearen Verhaltens höchstens auf kurze Zeit vorhersagbar (LIETZ 2008).

Fig. 3 fasst die sechs qualitativen systemspezifischen Eigenschaften, die aus der einschlägigen TP Literatur abgeleitet wurden, zusammen. Ihre theoretische und empirische Fundierung sowie ihre konkrete inhaltlich-fachliche Dokumentation erhöhen die Chance, sie in trennscharfen Testitems zu operationalisieren, womit das bestehende Systemkompetenzmodell (Fig. 1) hinsichtlich seiner Stufung, genauer der höchsten Niveaustufe 3, deutlich geschärft würde. Die vier erstgenannten Eigenschaften (nichtlineare Dynamik, mehrere stabile Zustände, Rückkopplungen, Irreversibilität) sind identisch mit den von MILKOREIT ET AL. (2018) in ihrer Metastudie vorgeschlagenen Mindestbedingungen (vgl. Kap. 3.1). *Selbstorganisation und Offenheit* werden in den referenzierten TP-Quellen zwar kaum expliziert, in vielen (obenzitierten) systemtheoretischen Arbeiten aber als sehr bedeutsam eingeschätzt. Im Gegensatz zur nahestehenden Emergenz spricht ihr Abstraktionsgrad zudem für eine realistische Operationalisierbarkeit. Die *Eingeschränkte Vorhersagbarkeit* wird in TP-Studien ausdrücklich thematisiert und mit Bezug auf Dimension 2 des bestehenden GeoSysKo-Modells (vgl. Fig. 1) als zentrales und operationalisierbares Merkmal von Systemen betrachtet. Angelehnt an dieses Kompetenzmodell ist davon auszugehen, dass sich fünf der sechs Eigenschaften der Dimension 1 und eine Eigenschaft der Dimension 2 zuordnen lassen. Die in Fig. 3 aufgeführten (supponierten) Niveaustufen orientieren sich am bereits für die GeoSysKo-Studie vorliegenden und bislang unveränderten Erkenntnisstand (MEHREN ET AL. 2018). Sie unterscheiden sich lediglich in ihrer Formulierung von dem grundlegenden Theoriemodell, indem je Stufe operationalisierbar konstatiert wird, was Lernende können. Eine schwache theoretische bzw. empirische Fundierung hinsichtlich einer möglichen Stufung besteht insbesondere für die Eigenschaft *Selbstorganisation*, weshalb sich die entsprechenden Beschreibungen einseitig auf den Teilaspekt der Offenheit beziehen. Ähnlich vage ist die Stufung in Bezug auf *Eingeschränkte Vorhersagbarkeit*. Eine Erweiterung des GeoSysKo-Modells würde u.a. eine wesentliche Präzisierung der Formulierungen in Fig. 3 bedeuten.

NICHTLINEARE DYNAMIK (abrupt, sprunghaft, diskontinuierlich, auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen)	
Dimension 1	Systemorganisation und -verhalten (Struktur, Grenze, Emergenz, Interaktion, Dynamik)
Stufe 1	Schüler betrachtet Phänomen bzw. System als statisch-stabil
Stufe 2	Schüler erkennt längere lineare kausal-dynamische Beziehungen
<b>Stufe 3</b>	<b>Schüler berücksichtigt nicht lineare (exponentielle und logistische) Entwicklungsverläufe</b>

MEHRERE STABILE ZUSTÄNDE (→ Nähe zur Emergenz)	
Dimension 1	Systemorganisation und -verhalten (Struktur, Grenze, Emergenz, Interaktion, Dynamik)
Stufe 1	Schüler nimmt Eigenschaften der Bestandteile als identisch mit Eigenschaften des ganzen Systems wahr
Stufe 2	Schüler fasst konkret wahrnehmbare Systembestandteile auf höherer Ebene als Teil einer allgemeineren Klasse mit gleichen oder ähnlichen Eigenschaften zusammen
<b>Stufe 3</b>	<b>Schüler nimmt wahr, dass das Zusammenwirken von Systembestandteilen auf einer höheren Ebene neue Strukturen mit neuen Eigenschaften entstehen lässt</b>

RÜCKKOPPELUNGEN (systeminterne Treiber des Wandels zwischen zwei Systemzuständen & Zustandsstabilisatoren)	
Dimension 1	Systemorganisation und -verhalten (Struktur, Grenze, Emergenz, Interaktion, Dynamik)
Stufe 1	Schüler stellt sich Kausalität monokausal vor
Stufe 2	Schüler erkennt Wechselbeziehungen, Reihen- und Parallelkoppelungen
<b>Stufe 3</b>	<b>Schüler erkennt Rückkoppelungen und Kreisläufe</b>

IRREVERSIBILITÄT (innerhalb einer für menschliche Gesellschaften relevanten Zeitskala)	
Dimension 1	Systemorganisation und -verhalten (Struktur, Grenze, Emergenz, Interaktion, Dynamik)
Stufe 1	Schüler besitzt kaum Bewusstsein über die zeitliche Dimension eines Systems
Stufe 2	Schüler stellt sich Entwicklungsverläufe als reversibel vor
<b>Stufe 3</b>	<b>Schüler erkennt die Irreversibilität von Entwicklungen</b>

SELBSTORGANISATION UND OFFENHEIT (→ Nähe zur Emergenz)	
Dimension 1	Systemorganisation und -verhalten (Struktur, Grenze, Emergenz, Interaktion, Dynamik)
Stufe 1	Schüler nimmt an, dass es primär Zufälle sind, die Prozesse bewirken
Stufe 2	/
<b>Stufe 3</b>	<b>Schüler erkennt die Offenheit von Systemen, indem er systeminterne und -externe Interaktion unterscheidet</b>

EINGESCHRÄNKTE VORHERSAGBARKEIT	
Dimension 2	Systemadäquate Handlungsintention (Prognose, Regulation)
Stufe 1	Schüler stellt sich System als vorhersagbar vor
Stufe 2	/
<b>Stufe 3</b>	<b>Schüler ist sich der eingeschränkten Vorhersagbarkeit bewusst</b>

### 3.3. Aufgabenbeispiel

Die Aufgabenentwicklung lehnt sich an die Erfahrungen im Rahmen der GeoSysKo-Studie an (vgl. MEHREN ET AL. 2015) und folgt einem quantitativen Forschungsansatz. Den Testitems voraus geht jeweils ein Aufgabenstamm (Fig. 4) mit den relevanten Informationen, die es für die Beantwortung der Items (Fig. 5 und Fig. 6) braucht. Damit wird der Einfluss des fachlichen Vorwissens entscheidend minimiert bzw. die valide Messung von Systemkompetenz erhöht. Dazu beitragen soll auch eine breite Vielfalt an Themen in den Aufgaben(-stämmen) – bezogen auf Natur-, Sozial- und Mensch-Umweltsysteme –, welche die Lehr-

pläne der gewählten Stichprobe berücksichtigen. Um in den Aufgaben die TP-Konzeption korrekt abbilden zu können, orientieren sie sich zudem an den ausführlich und fachlich breit dokumentierten TP Studien (vgl. Kap. 3.1). Wesentlich neu und eine große Herausforderung im Vergleich zur GeoSysKo-Studie ist die Entwicklung von Items, die trennscharf die sechs systemspezifischen Eigenschaften testen sollen (vgl. Kap. 4). Dabei adressieren diese Testitems ausschließlich die Kompetenzstufe 3, weil sich nur auf diesem Niveau die entsprechenden Eigenschaften in ihrem eigentlichen Verständnis entfalten. Vorherige Stufen repräsentieren lediglich Vorformen (vgl. Fig. 3).

**Fig. 3.** Potenzielle Ausdifferenzierungen des GeoSysKo-Kompetenzmodells im Hinblick auf systemspezifische Eigenschaften (An zwei Stellen fehlt die Ausgestaltung der Stufe 2. Bei diesen Eigenschaften finden sich in der Literatur nur vage Hinweise in Bezug auf das mittlere Niveau, sodass diese a priori nicht ausgewiesen werden können.) (Wesentliche Quellen: BEN-ZVI ASSARAF & ORION 2005; BOOTH-SWEENEY & STERMAN 2007; EGNER 2008; ELVERFELDT & EGNER 2015; JACOBSON 2001; LECHER 1997; LIEHR ET AL. 2006; PENNER 2000; RATER 2006; SOMMER 2005; TALANQUER 2009; WILENSKY & RESNICK 1999).

**Informationsblatt „Arktisches Meereis“**

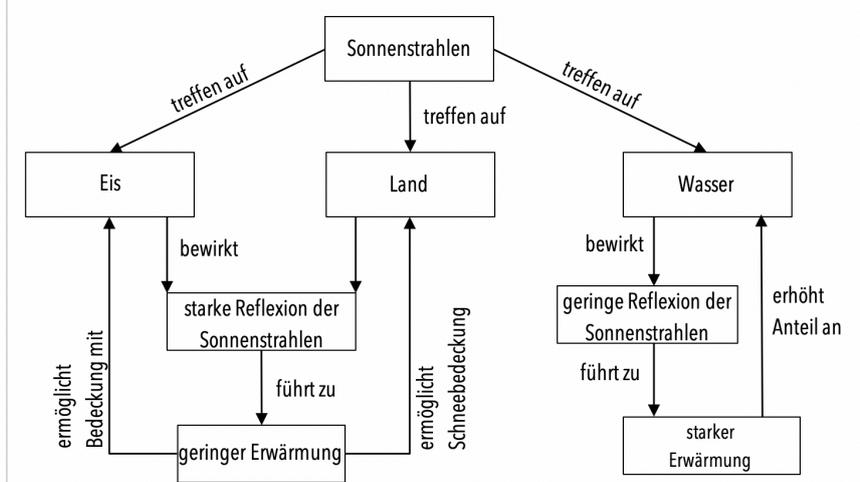
Die Arktis ist die Erdregion um den Nordpol. Sie besteht aus dem größtenteils von Eis bedeckten Nordpolarmeer und wenig Festland an den Rändern. Die Meereisbedeckung schwankt jahreszeitlich: Zum Ende des Polarwinters im März ist die Fläche um ca. viermal größer als zum Ende des Polarsommers im September. Aktuell gibt es aber auch Entwicklungen durch den Einfluss der globalen Erwärmung, wodurch derzeit die Eisbedeckung in allen Monaten des Jahres zurückgeht.

Eine Ursache dieses Rückgangs hängt mit der eingestrahelten Sonnenenergie zusammen. Helle, mit Eis bedeckte Flächen reflektieren die meisten Sonnenstrahlen zurück ins Weltall. Entsprechend erwärmt sich die Erdoberfläche nur wenig. Schmilzt das Eis, kommt dunkleres Wasser zum Vorschein, das einen Großteil der Sonnenenergie aufnimmt und in Wärme umwandelt. Nur wenig Licht wird reflektiert.

**Item 1**

Die folgende Concept Map zeigt die unterschiedliche Wirkung von Sonnenstrahlen auf Eis-, Land- und Wasserflächen in der Arktis. Sie enthält drei Kreisläufe. Ein Kreislauf ist falsch, einer verstärkt sich selbst und einer ist in sich stabil.

*Markiere alle Pfeile, die Teil des sich verstärkenden Kreislaufs sind.*



**Fig. 4.** Aufgabenstamm zum arktischen Meereis (Gekürzte Beschreibung der Ausgangslage für die Beantwortung der Items 1 und 2) (Quelle: Autoren).

**Fig. 5.** Testitem zur systemspezifischen Eigenschaft Rückkopplungen (Quelle: Autoren).

## 4. Aufgabenformate zur Testung der systemspezifischen Eigenschaften

Nebst der Erweiterung der Kompetenzstufe 3 bezüglich der ausdifferenzierten qualitativen Systemeigenschaften und ihrer psychometrischen Überprüfung (vgl. Kap. 3.3) zielt das hier skizzierte Vorgehen auch wesentlich darauf ab, neue Aufgabenformate in Bezug auf die dritte Kompetenzstufe zu entwickeln, um trennscharf die sechs systemspezifischen Eigenschaften testen zu können. Dazu wurden Aufgabenformate von zahlreichen Studien analysiert, wobei drei Gruppen unterteilt werden können:

(A) Zahlreiche Untersuchungen unterscheiden in ihrer Testung weder explizit zwischen systemischen Kompetenzdimensionen noch Teileigenschaften. Sie verwenden nicht-kategorisierte Varianten von Testaufgaben zur Testung eines eindimen-

sionalen *Globalwerts* Systemkompetenz (u.a. HRIN ET AL. 2017). Bei genauerer Analyse zeigt sich, dass die unterschiedlichen Testaufgaben durchaus immanent verschiedene systemische Eigenschaften adressieren. Diese werden aber weder in der Konzeption noch in der Auswertung systematisch berücksichtigt.

(B) Studien der zweiten Kategorie entwickeln Testaufgaben auf der Basis von Kompetenzmodellen. Dies führt dazu, dass die Aufgaben vielfach nicht explizit auf einzelne systemspezifische Eigenschaften rekurrieren, sondern die Aufgabenentwicklung auf einem höheren Abstraktionsniveau (= Kompetenzdimensionen/-stufe) angesiedelt sind. Dabei unterscheiden sich die Kompetenzmodelle, auf die rekurriert wird

(vgl. ausführlich MEHREN ET AL. 2016). Exemplarisch können das BMBF-Projekt SysThema (u.a. FANTA ET AL. 2017) und seine Adaption (BROCKMÜLLER 2019; BROCKMÜLLER & SIEGMUND 2020), die GeoSysKo-Studie (MEHREN ET AL. 2018), die Arbeiten am IPN (SOMMER 2005; BRANDTSTÄTTER ET AL. 2012), das Heidelberger *Inventory of Geographic System Competency Model* (VIEHRIG ET AL. 2017) sowie weitere internationale Studien u.a. von BOLLMANN-ZUBERBÜHLER (2008), HMELO-SILVER ET AL. (2007) und SNAPIR ET AL. (2017) angeführt werden.

(C) In einer dritten Gruppe können die Studien aggregiert werden, die einzelne systemspezifische Eigenschaften in konkreten Testaufgaben abzubilden versucht haben:

- BEN-ZVI ASSARAF und ORION (2005) operieren mit einem größeren Arsenal an Er-

hebungsinstrumenten (u.a. *Cyclic Thinking Questionnaire, Global Magnitude Questionnaire, Repertory Grid*). Die unterschiedlichen Erhebungsinstrumente werden acht Systemeigenschaften zugeordnet: Identifizierung der Systemkomponenten/-prozesse, der Beziehungen und der Dynamik, Verständnis von Kreisläufen, systemische Organisation, Generalisierung, Verständnis versteckter Systemdimensionen sowie Zeitperspektive. Diese Zuordnung erfolgt nicht immer trennscharf. Manche Erhebungsinstrumente testen mehrere Eigenschaften. Weitere Arbeiten rekurren auf diese Einteilung (u.a. BEN-ZVI ASSARAF & ORION 2010; TRIPTO ET AL. 2016).

- BOOTH SWEENEY und STERMAN (2007) haben das *Systems-Based Inquiry* zur Testung von Systemdynamik entwickelt. Dieses besteht aus Stock-Flow-Aufgaben, die

**Item 2**  
 Wenn sich die globale Mitteltemperatur immer mehr erhöht, hat dies einen Einfluss auf die Arktis. Die folgende Concept Map zeigt den entsprechenden Kreislauf:

```

    graph TD
      A[Anstieg der in Wärme umgewandelten Sonnenenergie] -- führt zu --> B[Anstieg der Lufttemperatur]
      B -- führt zu --> C[Rückgang der Schnee- und Eisbedeckung]
      C -- führt zu --> D[Rückgang der Reflexion der Sonnenstrahlen]
      D -- führt zu --> A
    
```

Für die Zukunft sind verschiedene Szenarien denkbar, die diesen Kreislauf beenden und eine Stabilisierung bewirken könnten.  
Welche der folgenden Szenarien (A-D) können zu stabilen Bedingungen führen?  
 Wähle die aus deiner Sicht plausiblen Szenarien aus und begründe möglichst ausführlich, indem du anhand des obigen Kreislaufs beschreibst, wie er sich stabilisiert.

Bitte die passenden Szenarien ankreuzen und ausführlich, mit Bezug auf den Kreislauf oben, begründen.

	Dieses Szenario kann den Kreislauf beenden:
A) Infolge eines Vulkanausbruchs findet eine Abkühlung der Lufttemperatur statt.	
B) Ab einem bestimmten Punkt führt die ansteigende Wärmeumwandlung von Sonnenenergie nicht mehr zu einem Anstieg der Lufttemperatur.	
C) Im Winter wird ein Teil des geschmolzenen Meereises neu gebildet und die Reflexion der Sonnenstrahlen nimmt wieder zu.	
D) Alle arktischen Schnee- und Eisflächen sind ganzjährig verschwunden.	

Szenario ..... ist plausibel, weil:

Fig. 6. Testitem zur systemspezifischen Eigenschaft *mehrere stabile Zustände* (Quelle: Autoren).

Rückkoppelungsstrukturen, Nichtlinearitäten, Zeithorizonte, Zeitverzögerungen sowie Bestands-/Flussstrukturen abtesten. Auch hier werden wiederum die Teileigenschaften nur bedingt trennscharf ermittelt. Weitere Arbeiten (u.a. KAINZ & OSSIMITZ 2002; HILDEBRAND 2006) greifen auf dieses Aufgabeninventar zurück.

- Auch EVAGOROU ET AL. (2009) weisen ihren Testaufgaben spezifische Systemeigenschaften zu. Diese sind Identifikation von Systemelementen, von räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen, von Sub-/Teilsystemen, von Beziehungszusammenhängen, von Rückkopplungseffekten sowie von Wirkungshebeln.

- Cox (2018) entwickelt in ihrer Dissertation nicht nur Aufgaben zu vier systemspezifischen Eigenschaften (Beziehungen, Emergenz, Rückkoppelungen sowie Dynamik), sondern versucht auch geographiespezifische Aspekte einzubringen. Sie formuliert Items zur Identifikation von Elementen und Beziehungen auf räumlichen Maßstabsebenen, Identifikation von Beziehungen zwischen Mensch und Umwelt sowie Beziehungen zwischen geographisch relevanten Zeithorizonten.

In den Forschungsprojekten der Gruppe C diente die Unterteilung in systemspezifische Eigenschaften in der Regel als Heuristik, um theoriebasiert verschiedene Aufgabenformate zu entwickeln. In keiner dieser Studien wurden die Aufgabenformate dahingehend untersucht, ob sie verschiedene (Teil-)Fähigkeiten erfassen.

Im Rahmen dieser umfassenden Aufarbeitung konnten über siebzig verschiedene Aufgabenformate identifiziert werden. Dabei flossen nicht nur Forschungsprojekte der Gruppe C ein, sondern auch der anderen beiden Gruppen, die in Bezug auf ihre systemspezifischen Eigenschaften analysiert und kategorisiert wurden. Bei der Zuordnung verschiedener Aufgabenformate zu den sechs für das Verständnis von TP relevanten systemspezifischen Eigenschaften (Fig. 3) zeigt sich, dass in manchen Bereichen bereits (zumindest einige) präzise Aufgabenformate vorliegen (z.B. nichtlineare Dynamik, Rückkopplungen), in anderen Bereichen hingegen bislang die systemische Eigenschaft eher ungenau umgesetzt wird (z.B. mehrere stabile Zustände). Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der zusätzli-

chen Entwicklung von Aufgabenformaten im Rahmen weiterer Untersuchungen. Dies gilt insbesondere, wenn jede systemspezifische Eigenschaft durch zwei unterschiedliche Aufgabenformate getestet werden soll, um deren Einfluss zu minimieren. Dass Aufgabenformate im Bereich von Systemkompetenz einen Einfluss auf die Testergebnisse haben, hat sich bereits in GeoSysKo gezeigt. Die Kontrolle im Sinne des Vergleichs von *Regular Items* (Aufgabenformate wie z.B. Multiple Choice, Short Answers etc., die im PISA-Assessment etabliert sind) und Concept Map-Aufgaben erbrachte eine hohe, aber nicht sehr hohe latente Korrelation von .84 (MEHREN ET AL. 2018).

Nachfolgend sind die beiden Aufgabenformate aus der Literatur aufgelistet, die als Ausgangspunkt einer geplanten Aufgabenentwicklung dienen. Wie beschrieben, gibt es einerseits Formate, die in großen Teilen übernommen werden können und andere, die lediglich Denkanstöße sind, die systemspezifische Eigenschaft jedoch nicht exakt erfassen.

#### *Nichtlineare Dynamik*

- Probanden bekommen ein Verlaufsdigramm und die passende Concept Map (CM). Sie müssen mit der CM das Verlaufsdigramm analysieren (u.a. BOLLMANN-ZUBERBÜHLER 2008).

- Die Probanden werden mit einem plötzlich aufgetretenen Phänomen konfrontiert (z.B. Affenpopulation sinkt im Regenwald). Sie müssen anhand einer vorgegebenen CM vermuten, was passiert sein könnte (EVAGOROU ET AL. 2009).

#### *Mehrere stabile Zustände*

- Die Probanden beantworten auf der Basis einer gegebenen CM Fragen (Cox 2018).

- Es werden basierend auf einer vorgegebenen Systemdarstellung einzelne Systemteile isoliert, entfernt oder hinzugefügt. Die Probanden analysieren die resultierenden Veränderungen im Hinblick auf die Systememergenz (u.a. SOMMER 2005).

#### *Rückkoppelungen*

- Probanden werden auf textlicher Basis Szenarien dargereicht, die Ursache-Wirkungs-Beziehungen im Sinne einer Rückkopplung (Verstärkung/Ausgleich) darstellen. Es muss beurteilt werden, welche analog sind (u.a. BOOTH SWEENEY & STERMAN, 2007).

- Probanden beurteilen, welcher von mehreren vorgegebenen Kreisläufen/ Rück-

kopplungen eine Abbildung/einen Text korrekt repräsentiert (u.a. BROCKMÜLLER 2019).

#### *Irreversibilität*

- Es werden verschiedene Szenarien dargereicht. Die Probanden erläutern anhand eines Verlaufsdiagramms die Folgen (u.a. BROCKMÜLLER 2019).
- Es müssen in „Was wäre, wenn...“-Fragen Folgen abgeschätzt werden (u.a. SOMMER 2005).

#### *Selbstorganisation und Offenheit*

- Bei einem vorgegebenen Kreislauf wird eine Störung geschildert (z.B. Zunahme der Temperatur). Die Probanden müssen in einer Multiple Choice-Aufgabe die Folge beurteilen (u.a. FANTA ET AL. 2017).

- Es werden verschiedene Szenarien (z.B. Entwicklung des Klimas) dargereicht. Die Probanden erläutern anhand eines Verlaufsdiagramms (z.B. Bodenbedeckung im Jahresverlauf) die Folgen (u.a. BROCKMÜLLER 2019).

#### *Eingeschränkte Vorhersagbarkeit*

- Es wird in Multiple Choice-Aufgaben mit Antwortkategorien wie z.B. „Die weitere Entwicklung ist nicht vorhersagbar“ gearbeitet (u.a. Klieme & Maichle 1994).
- Es werden basierend auf einem Aufgabenstamm alternative Szenarien und regulative Maßnahmen vorgegeben. Die Probanden beurteilen die Alternativen (auch vor dem Hintergrund einer eingeschränkten Vorhersagbarkeit) (u.a. SOMMER 2005).

## 5. Ausblick

Die Hauptzielsetzung des vorliegend skizzierten Vorhabens besteht darin, eine normativ-bildungstheoretische Erweiterung der Kompetenzstufe 3 im GeoSysKo-Modell in Bezug auf die Ausdifferenzierung qualitativer Systemeigenschaften inklusive der dazugehörigen Testaufgaben(formate) empirisch zu fundieren. Ein möglicher Weg, wie dies angegangen werden könnte, wurde hier vorgestellt. Vor dem Hintergrund der Erfahrungen der GeoSysKo-Studie wird die Entwicklung von Testitems, die trennscharf das Verständnis spezifischer Systemeigenschaften bei Lernenden diagnostizieren, als sehr anspruchsvoll eingeschätzt. Umso wichtiger ist dabei der Einbezug psychometrischer Expertise. Zahlreiche zukünftige Studien mit unterschiedlichem Zugang (*large scale assessment*, experimentell-empirische Interventionsstudien, Prozessanalysen etc.) könnten die theoretisch und empirisch fundierte Modellerweiterung nutzen, um die Messung der (geographischen) Systemkompetenz im Sinne einer modellbasierten, kriterienorientierten Auswertung zu optimieren.

genschaften bei Lernenden diagnostizieren, als sehr anspruchsvoll eingeschätzt. Umso wichtiger ist dabei der Einbezug psychometrischer Expertise. Zahlreiche zukünftige Studien mit unterschiedlichem Zugang (*large scale assessment*, experimentell-empirische Interventionsstudien, Prozessanalysen etc.) könnten die theoretisch und empirisch fundierte Modellerweiterung nutzen, um die Messung der (geographischen) Systemkompetenz im Sinne einer modellbasierten, kriterienorientierten Auswertung zu optimieren.

## Literatur

- BAK, P. (1996). *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Springer.
- BATHIANY, S., NOTZ, D., MAURITSEN, T., BROVKIN, V., & RAEDEL, G. (2016a). On the Potential for Abrupt Arctic Winter Sea-ice Loss. *Journal of Climate*, 29, 2703–2719.
- BATHIANY, S., VAN DER BOLT, B., WILLIAMSON, M. S., LENTON, T. M., SCHEFFER, M., VAN NES, E. H., & NOTZ, D. (2016b). Statistical Indicators of Arctic Sea Ice Stability – Prospects and Limitations. *The Cryosphere*, 10, 1631–1645.
- BEN-ZVI ASSARAF, O., & ORION, N. (2005). Development of System Thinking Skills in the Context of Earth System Education. *Journal of Research in Science Teaching*, 42, 518–560.
- BEN-ZVI ASSARAF, O., & ORION, N. (2010). Four Case Studies, Six Years Later: Developing System Thinking Skills in Junior High School and Sustaining Them Over Time. *Journal of Research in Science Teaching*, 47, 1253–1280.
- BILDUNGSSERVER KLIMAWANDEL (2020). *Kippunkte*. (21.09.2020).
- BOLLMANN-ZUBERBÜHLER, B. (2008). Lernwirksamkeitsstudie zum systemischen Denken an der Sekundarstufe I. In U. FRISCHKNECHT-TOBLER, U. NAGEL & H. J. SEYBOLD (Hg.), *Systemdenken – Wie Kinder und Jugendliche komplexe Systeme*

- verstehen lernen (S. 99-108). Zürich: Pestalozzianum.
- BOOTH SWEENEY, L., & STERMAN, J. D. (2007). Thinking about Systems: Student and Teacher Conceptions of Natural and Social Systems. *System Dynamics Review*, 23, 285-312.
- BRANDTSTÄTTER, K., HARMS, U., & GROSSSCHEDL, J. (2012). Assessing System Thinking through Different Concept-mapping Practices. *International Journal of Science Education*, 34, 2147-2170.
- BROCKMÜLLER, S. (2019). *Erfassung und Entwicklung von Systemkompetenz*. Heidelberg (Dissertation).
- BROCKMÜLLER, S., & SIEGMUND, A. (2020). Erfassung und Entwicklung von Systemkompetenz. Empirische Befunde zu Kompetenzstruktur und Förderbarkeit durch den Einsatz analoger und digitaler Modelle. *Zeitschrift für Geographiedidaktik | Journal of Geography Education (ZGD)*, 48, 31-49.
- BRODERSTAD, E. G., & EYTHORSSON, E. (2014). Resilient Communities? Collapse and Recovery of a Social-ecological System in Arctic Norway. *Ecology and Society*, 19, 1-10.
- CENTOLA, D., BECKER, J., BRACKBILL, D., & BARONCHELLI, A. (2018). Experimental Evidence for Tipping Points in Social Convention. *Science*, 360, 1116-1119.
- COX, M. (2018). *A Systems Thinking Approach in Secondary Geography Education*. Leuven (Dissertation).
- DAI, L., VORSELEN, D., KOROLEV, K. S., & GORE, J. (2012). Generic Indicators for Loss of Resilience before a Tipping Point Leading to Population Collapse. *Science*, 336, 1175-1177.
- DGFG (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOGRAPHIE) (2020). *Bildungsstandards im Fach Geographie für den Mittleren Schulabschluss*. Bonn: Selbstverlag.
- EGNER, H. (2008). Komplexität. Zwischen Emergenz und Reduktion. In H. EGNER, B. M. W. RATTER & R. DIKAU (Hg.), *Umwelt als System - System als Umwelt?* (S. 39-54). München: Oekom.
- ELVERFELDT VON, K., & EGNER H. (2015). Systemtheorien und Mensch-Umwelt-Forschung: Eine geographische Perspektive. In P. GOEKE, R. LIPPUNER & J. WIRTHS (Hg.), *Konstruktion und Kontrolle* (S. 319-342). Wiesbaden: Springer VS.
- EVAGOROU, M., KONSTANTIONS, J. K., NICOLAOU, C. T., & CONSTANTINO, C. P. (2009). An Investigation of the Potential of Interactive Simulations for Developing System Thinking Skills in Elementary School: A Case Study with Fifth-graders and Sixth-graders. *International Journal of Science Education*, 31, 655-674.
- FANTA, D., BRÄUTIGAM, J., GREIFF, S., & RIESS, W. (2017). Entwicklung und Validierung eines Messinstrumentes zur Erfassung von systemischem Denken bei Lehramtsstudierenden in ökologischen Kontexten. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 23, 241-259.
- FILATOVA, T., POLHILL, J. G., & VON EWIKJ S. (2015). Regime Shifts in Coupled Socio-environmental Systems: Review of Modelling Challenges and Approaches. *Environmental Modelling & Software*, 75, 333-347.
- FINLEY, F. N., NAM, Y., & OUGHTON, J. (2011). Earth Systems Science: An Analytic Framework. *Science Education*, 95, 1066-1085.
- GILBERT, N., & TROITZSCH, K. G. (2005). *Simulation for the Social Scientist*. Maidenhead: Open University Press.
- GRODZINS, M. (1957). Metropolitan Segregation. *Scientific American*, 197, 33-41.
- HILDEBRAND, K. (2006). *Die Wirkung systemischer Darstellungsformen und multiperspektivischer Wissensrepräsentationen auf das Verständnis des globalen Kohlenstoffkreislaufs* (Dissertation).
- HMELO-SILVER, C. E., & AZEVEDO, R. (2006). Understanding Complex Systems: Some Core Challenges. *The Journal of the Learning Sciences*, 15, 53-61.
- HMELO-SILVER, C. E., MARATHE, S., & LIU, L. (2007). Fish Swim, Rocks Sit, and Lungs Breathe: Expert-novice Understanding of Complex Systems. *The Journal of the Learning Science*, 16, 307-331.
- HRIN, T. N., MILENKOVIC, D. D., SEGEDINAC, M. D., & HORVAT, S. (2017). Systems Thinking in Chemistry Classroom: The Influence of Systemic Synthesis Questions on its Development and Assessment. *Thinking Skills and Creativity*, 23, 175-187.
- HUMMEL, D., JAHN, T., KEIL, F., LIEHR, S., & STIESS, I. (2017). Social Ecology as Critical,

- Transdisciplinary Science. Conceptualizing, Analyzing and Shaping Societal Relations to Nature. *Sustainability*, 9, 1050.
- IPCC (2019a). *Global Warming of 1.5°C*. Genf: IPCC.
- IPCC (2019b). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Genf: IPCC.
- JACOBSON, M. J. (2001). Problem Solving, Cognition, and Complex Systems: Differences between Experts and Novices. *Complexity*, 6, 41–49.
- KAINZ, D., & OSSIMITZ, G. (2002). Can Students Learn Stock-flow-thinking? An Empirical Investigation. <https://proceedings.systemdynamics.org/2002/proceed/papers/Kainz1.pdf> (21.09.2020)
- KERR, R. A. (2008). Climate Tipping Points Come in from the Cold. *Science*, 319, 153.
- KLIEME, E., & MAICHLE, U. (1994). *Modellbildung und Simulation im Unterricht der Sekundarstufe I*. Bonn: IBF.
- KRIEGLER, E., HALL, J. W., HELD, H., DAWSON, R., & SCHELLNHUBER, H. J. (2009). Imprecise Probability Assessment of Tipping Points in the Climate System. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 5041–5046.
- LECHER, T. (1997). *Die Umweltkrise im Alltagsdenken*. Weinheim: Beltz.
- LENTON, T. M. (2013). Environmental Tipping Points. *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 1–29.
- LENTON, T. M., HELD, H., KRIEGLER, E., HALL, J. W., LUCHT, W., RAHMSTORF, S., & SCHELLNHUBER, H. J. (2008). Tipping Elements in the Earth's Climate System. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 1786–1793.
- LENTON, T. M., ROCKSTRÖM, J., GAFFNEY, O., RAHMSTORF, S., RICHARDSON, K., STEFFEN, W., & SCHELLNHUBER, H. J. (2019). Climate Tipping Points—Too Risky to Bet Against. *Nature*, 575, 592–595.
- LIEHR, S., BECKER, E., & KEIL, F. (2006). Systemdynamiken. In E. BECKER & T. JAHN (Hg.), *Soziale Ökologie* (S. 267–283). Frankfurt/Main: Campus.
- LIETZ, H. (2008). *Komplexe soziale Systeme. Emergenz und Selbstähnlichkeit: Zum neuen Paradigma der Komplexitätstheorie*. (21.09.2020)
- LUHMANN, N. (1984). *Soziale Systeme: Grundriß einer allgemeinen Theorie*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- LUHMANN, N. (1988). Neuere Entwicklung in der Systemtheorie. *Mercur*, 42, 292–300.
- MEHREN, R., REMPFLER, A., ULRICH-RIEDHAMMER, E. M., BUCHHOLZ, J., & HARTIG, J. (2015). Wie lässt sich Systemdenken messen? *Geographie aktuell & Schule*, 37, 4–16.
- MEHREN, R., REMPFLER, A., ULRICH-RIEDHAMMER, E. M., BUCHHOLZ, J., & HARTIG, J. (2016). Systemkompetenz im Geographieunterricht. Ein theoretisch hergeleitetes und empirisch überprüfbares Kompetenzstrukturmodell. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 22, 147–163.
- MEHREN, R., REMPFLER, A., BUCHHOLZ, J., HARTIG, J., & ULRICH-RIEDHAMMER, E. M. (2018). System Competence Modelling: Theoretical Foundation and Empirical Validation of a Model Involving Natural, Social, and Human-environment Systems. *Journal of Research in Science Teaching*, 55, 685–711.
- MILKOREIT, M., HODBOD, J., BAGGIO, J., BENESSIAH, K., CALDERÓN-CONTRERAS, R., DONGES, J. F., MATHIAS, J.-D., ROCHA, J. C., SCHOON, M., & WERNERS, S. E. (2018). Defining Tipping Points for Social-ecological Systems Scholarship—An Interdisciplinary Literature Review. *Environmental Research Letters*, 13, 1–12.
- MITCHELL, M. (2009). *Complexity: A Guided Tour*. New York: Oxford University Press.
- NEWMAN, D. V. (1996). Emergence and Strange Attractors. *Philosophy of Science*, 63, 245–261.
- NICOLIS, G., & PRIGOGINE, I. (1977). *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*. New York: Wiley.
- NOTZ, D. (2009). The Future of Ice Sheets and Sea Ice: Between Reversible Retreat and Unstoppable Loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106, 20590–20595.
- ORION, N., & LIBARKIN, J. (2014). Earth System Science Education. In N. G. LEDERMAN & S. K. ABELL (Hg.), *Handbook of Research on Science Education* (Vol. II, S. 481–496). New York: Routledge.
- OSSIMITZ, G. (1994). *Systemdynamiksoftware und Mathematikunterricht*. Klagensfurt: Universität Klagensfurt.

- PENNER, D. E. (2000). Explaining Systems: Investigating Middle School Students' Understanding of Emergent Phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 37, 784-806.
- PIK (POTSDAM-INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG) (2008). *Kippelemente im Klimasystem der Erde*. (21.09.2020)
- POINCARÉ, H. (1885). Sur l'équilibre d'une masse fluide animée d'un mouvement de rotation. *Acta Mathematica*, 7, 259-380.
- RATTER, B. M. W. (2006). Komplexitätstheorie und Geographie. *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft*, 148, 109-124.
- RATTER, B. M. W. (2012): Complexity and Emergence: Key Concepts in Non-linear Dynamic Systems. In M. GLASER, G. KRAUSE, B. M. W. RATTER & M. WELP (Hg.), *Human-nature Interactions in the Anthropocene* (S. 90-104). New York: Routledge.
- RATTER, B. M. W., & TREILING, T. (2008). Komplexität - oder was bedeuten die Pfeile zwischen den Kästchen? In H. EGNER, B. M. W. RATTER & R. DIKAU (Hg.), *Umwelt als System - System als Umwelt?* (S. 23-38). München: Oekom.
- REID, W. V., CHEN, D., GOLDFARB, L., HACKMANN, H., LEE, Y. T., MOKHELE, K., OSTROM, E., RAIVIO, K., ROCKSTROM, J., SCHELLNHUBER, H. J., & WHYTE, A. (2010). Earth System Science for Global Sustainability: Grand Challenges. *Science*, 330, 916-917.
- REMPFLER, A., & UPHUES, R. (2010). Sozialökologisches Systemverständnis: Grundlage für die Modellierung von geographischer Systemkompetenz. *Geographie und ihre Didaktik | Journal of Geography Education (GuiD)*, 38, 205- 217.
- REMPFLER, A., & UPHUES, R. (2011). Systemkompetenz und ihre Förderung im Geographieunterricht. *Geographie und Schule*, 33, 22-33.
- ROCHA, J. C., PETERSON, G., BODIN, Ö., & LEVIN, S. (2018). Cascading Regime Shifts Within and Across Scales. *Science*, 362, 1379-1383.
- RUIZ-PRIMO, M. A., SCHULTZ, S. E., LI, M., & SHAVELSON, R. J. (2001). Comparison of the Reliability and Validity of Scores from two Concept-mapping Techniques. *Journal of Research in Science Teaching*, 38, 260-278.
- SCHEFFER, M. (2010). Complex Systems: Foreseeing Tipping Points. *Nature*, 467, 411-412.
- SCHEFFER, M., CARPENTER, S., FOLEY, J. A., FOLKE, C., & WALKER, B. (2001). Catastrophic Shifts in Ecosystems. *Nature*, 413, 591-596.
- SCHEFFER, M., BASCOMPTE, J., BROCK, W. A., BROVKIN, V., CARPENTER, S. R., DAKOS, V., HELD, H., VAN NES, E. H., RIETKERK, M., & SUGIHARA, G. (2009). Early-warning Signals for Critical Transitions. *Nature*, 461, 53-59.
- SMITH, J. B., SCHELLNHUBER, H. J., & MONIRUL QADER MIRZA, M. (2001). Vulnerability to Climate Change and Reasons for Concern: A Synthesis. In J. J. MCCARTHY, O. F. CANZIANI, N. A. LEARY, D. J. DOKKEN & K. S. WHITE (Hg.), *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (S. 913-967). Cambridge: Cambridge University Press.
- SNAPIR, Z., EBERBACH, C., BEN-ZVI ASSARAF, O., HMELO-SILVER, C., & TRIPTO, J. (2017). Characterising the Development of the Understanding of Human Body Systems in Highschool Biology Students-A Longitudinal Study. *International Journal of Science Education*, 39, 2092-2127.
- SOMMER, C. (2005). *Untersuchung der Systemkompetenz von Grundschulern im Bereich Biologie* (Dissertation).
- STEFFEN, W., RICHARDSON, K., ROCKSTRÖM, J., SCHELLNHUBER, H. J., DUBE, O. P., DUTREUIL, S., LENTON, T. M., & LUBCHENCO, J. (2020). The Emergence and Evolution of Earth System Science. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 54-63.
- STEPHAN, A. (2016). *Emergenz: Von der Unvorhersagbarkeit zur Selbstorganisation*. Münster: mentis.
- STROGATZ, S. H. (1994). *Nonlinear Dynamics and Chaos*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- SUGIARTO, H. S., CHUNG, N. N., LAI, C.-H., & CHEW, L. Y. (2015). Socioecological Regime Shifts in the Setting of Complex Social Interactions. *Physical Review E*, 91, 062804.
- TALANQUER, V. (2009). On Cognitive: Constraints and Learning Progressions: The Case of "Structure of Matter". *International Journal of Science Education*, 31, 2123-2136.

- TRIPTO, J., BEN-ZVI ASSARAF, O., SNAPIR, Z., & AMIT, M. (2016). The 'What is a System' Reflection Interview as a Knowledge Integration Activity for High School Students' Understanding of Complex Systems in Human Biology. *International Journal of Science Education*, 38, 564-595.
- VIEHRIG, K., SIEGMUND, A., FUNKE, J., WÜSTENBERG, S., & GREIFF, S. (2017). The Heidelberg Inventory of Geographic System Competency Model. In D. LEUTNER, J. FLEISCHER, J. GRÜNKORN & E. KLIEME (Hg.), *Competence Assessment in Education: Research, Models, and Instruments* (S. 31-53). Heidelberg: Springer.
- WASSMANN, P. & LENTON, T. M. (2012). Arctic Tipping Points in an Earth System Perspective. *AMBIO*, 41, 1-9.
- WILENSKY, U., & RESNICK, M. (1999). Thinking in Levels: A Dynamic Systems Approach to Making Sense of the World. *Journal of Science Education and Technology*, 8, 3-19.
- WISSEL, C. (1984). A Universal Law of the Characteristic Return Time Near Thresholds. *Oecologia*, 65, 101-107.
- YIN, Y., VANIDES, J., RUIZ-PRIMO, A. M., AYALA, C. C., & SHAVELSON, R. J. (2005). Comparison of Two Concept-mapping Techniques: Implications for Scoring, Interpretation, and Use. *Journal of Research in Science Teaching*, 42, 166-184.
- YOUNG, O. R. (2012). Arctic Tipping Points: Governance in Turbulent Times. *AMBIO*, 41, 75-84.
- ZEEMAN, E. C. (1976). Catastrophe Theory. *Scientific American*, 234, 65-83.