

Physikalische Dynamik der Küste für außerschulische Lernorte rekonstruieren

Kai Bliesmer^{1,*} & Michael Komorek^{1,*}

¹ Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

* Kontakt: Carl von Ossietzky Universität Oldenburg,

Institut für Physik,

Didaktik der Physik und Wissenschaftskommunikation,

Ammerländer Heerstraße 114–118, 26129 Oldenburg

kai.bliesmer@uni-oldenburg.de; michael.komorek@uol.de

Zusammenfassung: Den vielen außerschulischen Lernorten an der norddeutschen Wattenmeerküste mangelt es in ihren Bildungsangeboten an Erklärungen und Modellen, die sich eignen, um auch die dortige physikalische Dynamik in Form von Strömungs- und Strukturbildungsphänomenen zu erklären. Die Lernortleitenden berichten, dass Besuchende Fragen zu entsprechenden Phänomenen stellen, die weder von ihnen noch den Bildungsangeboten beantwortet werden können. Die vorliegende Studie widmet sich diesem Defizit. Sie ist in einem übergeordneten Projekt angesiedelt, das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert wird. Das übergeordnete DBU-Projekt zielt darauf ab, Exponate für außerschulische Lernorte zu entwickeln, die auch die physikalische Sicht auf die Dynamik an der Küste repräsentieren. Die vorliegende Studie leistet zu diesem übergeordneten Projekt insofern einen Beitrag, als eine Didaktische Rekonstruktion der physikalischen Dynamik an der Küste durchgeführt wurde, die darauf abzielte, Leitlinien für eine didaktische Strukturierung zu entwickeln. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde im Rahmen der Didaktischen Rekonstruktion zunächst fachliche Klärung betrieben, indem die zentralen physikalischen Grundideen des Themenfelds herausgearbeitet wurden. Im zweiten Schritt wurden Lernendenperspektiven auf Strömungen und Strukturbildungen mit einer Interviewstudie erfasst. Dabei wurde zum einen beforscht, welche Merkmale Lernende mit den beiden Termini „Strömung“ und „Strukturbildung“ assoziieren. Zum anderen wurde untersucht, wie Lernende die Entstehung von Strömungen und Strukturbildungen erklären. Im dritten Schritt wurden die physikalischen Grundideen mit den untersuchten Lernendenperspektiven verglichen. Auf Basis dieses Vergleichs wurden Leitlinien für eine didaktische Strukturierung zur physikalischen Dynamik an der Küste erarbeitet. Diese Leitlinien dienen im übergeordneten DBU-Projekt der Unterstützung der Zusammenarbeit zwischen Physikdidaktik, Lernortleitenden und Ausstellungsagenturen zur Entwicklung neuer Ausstellungsexponate.

Schlagwörter: Didaktische Rekonstruktion, außerschulische Lernorte, Küste, Wattenmeer, Strömungen, Strukturbildungen, empirische Forschung



1 Ziel und Beitrag der Studie

In der vorliegenden Studie, die in ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördertes Projekt eingebunden ist, wurde physikalisches Wissen zu Strömungen und Strukturbildungen im Kontext Küste für außerschulische Lernorte aufbereitet. Aufbereitung bedeutete hier, dass mit dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion Leitlinien für eine didaktische Strukturierung zur physikalischen Dynamik an der Küste entwickelt wurden. Die in der Studie entwickelten Leitlinien leisten einen Beitrag, um im übergeordneten DBU-Projekt die Zusammenarbeit zwischen Physikdidaktik, Lernortleitenden und Ausstellungsagenturen zur Entwicklung neuer Exponate zu unterstützen.

2 Motivation zur Durchführung der Studie

In Niedersachsen existiert eine große Anzahl von außerschulischen Lernorten an der Küste. Dazu zählen insbesondere die Nationalparkhäuser im Wattenmeer. Dort werden Exponate in Ausstellungen als Lehr-Lern-Angebote eingesetzt, die sich an Besuchende jeder Altersstufe richten (Roskam, 2016). Die bisherigen empirischen Untersuchungen, die in den Ausstellungen der Lernorte durchgeführt wurden, belegen einen starken Fokus auf biologisches Wissen (Bliesmer, 2016, 2020; Roskam, 2016). Umgekehrt mangelt es an Exponaten zu Phänomenen, die die Dynamik in der unbelebten Natur darstellen und für deren Entschlüsselung physikalisches Wissen notwendig ist. Hierzu zählen insbesondere Strömungs- und Strukturbildungsphänomene (z.B. Rippelbildung, Wasserwirbel).

Die Leitenden der Lernorte geben an, dass Besuchende Fragen zu physikalischen Phänomenen stellen, die sie nicht beantworten können. Deshalb möchten sie auch die physikalische Sicht auf die Dynamik der Küste in ihre Ausstellungen integrieren. Die Leitenden erklären, dass sie sich eine Unterstützung bei der Integration physikalischen Wissens in ihre Ausstellungen wünschen. Die vorliegende Studie leistete diese Unterstützung insofern, als sie auf die Aufbereitung der physikalischen Dynamik an der Küste abzielte. Mit den Ergebnissen der hier dargestellten Studie werden aktuell im rahmenden DBU-Projekt zusammen mit den Lernorten und Ausstellungsagenturen neue Exponate zur Dynamik an der Küste entwickelt, die die physikalische Sicht auf die Küstendynamik mit der in den Ausstellungen bereits vorhandenen biologischen Sicht verzahnen.

3 Didaktische Rekonstruktion als theoretische Rahmung

Die Auswahl eines theoretischen Rahmenmodells für die Aufbereitung von physikalischem Wissen orientierte sich an den empirischen Ergebnissen von Bliesmer (2016, 2020) und Roskam (2016) dazu, wie die Verantwortlichen an den Lernorten neue Exponate entwickeln: Sie arbeiten mit Ausstellungsagenturen zusammen. Allerdings verfügen die Agenturen meist über keine fachliche und im engeren Sinne fachdidaktische Kompetenz. Über fachliche Kompetenz verfügen lediglich die Leitenden der Lernorte. Bei ihnen handelt es sich aber meist um Personen aus den Bereichen Biologie und Umweltwissenschaften, weshalb die Exponate bisher vornehmlich biologisches Wissen widerspiegeln. Um die Zusammenarbeit zwischen den Leitenden der Lernorte und den Ausstellungsagenturen mit Blick auf physikalische Inhalte zu unterstützen, wurden in der hier präsentierten Studie Leitlinien für eine didaktische Strukturierung entwickelt. Solche Leitlinien sollen künftig bei der Entwicklung von neuen Exponaten zur Dynamik der Küste eingesetzt werden und die Verantwortlichen insofern entlasten, als sie die physikalischen Inhalte aus der Fachliteratur nicht selbst fachlich-fachdidaktisch aufbereiten müssen.

Bei der Entwicklung der Leitlinien fungierte das Modell der Didaktischen Rekonstruktion (Duit, Gropengießer, Kattmann, Komorek & Parchmann, 2012) als theoretische Rahmung. Das Modell wurde verwendet, weil es gemäß Komorek, Fischer und

Moschner (vgl. 2013, S. 51) gut geeignet und erprobt ist, um Leitlinien für eine didaktische Strukturierung zu entwickeln. Das Modell ist nachfolgend grafisch dargestellt.

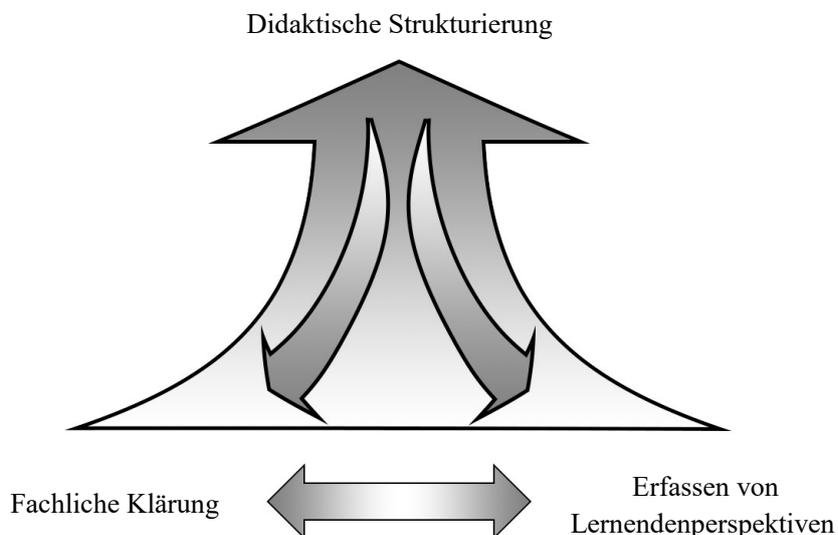


Abbildung 1: Grafische Darstellung der drei Teilbereiche in der Didaktischen Rekonstruktion (Kattmann, Duit, Gropengießer & Komorek, 1997)

Die Didaktische Rekonstruktion ist durch drei Bereiche charakterisiert, die zur Aufbereitung von Inhalten für Lernende zu bearbeiten sind. Zunächst ist eine fachliche Klärung zu leisten. Im vorliegenden Fall wurden hierzu im Rahmen einer Elementarisierung (Bleichroth, 1991) die wesentlichen physikalischen Grundideen im Themenfeld herausgearbeitet. Da die Lernenden aus konstruktivistischer Sicht die Inhalte eines Lern-Angebots stets durch die Brille ihres Vorwissens und ihrer Vorerfahrungen interpretieren (Gerstenmaier & Mandl, 1995; Widodo & Duit, 2004), ist im Modell der Didaktischen Rekonstruktion die Erfassung von Lernendenperspektiven ein wesentlicher Schwerpunkt. Im vorliegenden Fall fanden hierzu empirische Untersuchungen mit Lernenden statt. Zuletzt ist im Modell vorgesehen, die Ergebnisse der fachlichen Klärung und die Perspektive der Lernenden wechselseitig aufeinander zu beziehen und zu vergleichen. Ausgehend von diesem Vergleich wurden Vorschläge unterbreitet, wie sich an die Perspektive der Lernenden anknüpfen lässt und an welcher Stelle ihre Vorstellungen umgedeutet oder mit der wissenschaftlichen Sicht konfrontiert werden müssen (Duit, 2007; Kattmann & Gropengießer, 1996). Jene Vorschläge stellten im vorliegenden Fall die Leitlinien für eine didaktische Strukturierung dar.

3.1 Fachliche Klärung

Für die fachliche Klärung wurde das Konzept der Elementarisierung (Bleichroth, 1991) herangezogen. Gemäß Bleichroth (1991) gehört zur Elementarisierung dreierlei: Zunächst wurden aus der Fachliteratur die zentralen physikalischen Konzepte im Inhaltsbereich herausgearbeitet. Dann wurden die herausgearbeiteten Konzepte als physikalische Grundideen formuliert und mit Blick auf die Adressat*innen vereinfacht (Segmentierung). Zuletzt wurden die formulierten physikalischen Grundideen in eine sachlogische, aufeinander aufbauende Reihenfolge gestellt (Sequenzierung), sodass sie Lernschritte repräsentieren. Das Ergebnis dieses Dreischritts ist in Kapitel 3.1.5 dargestellt.

3.1.1 Bereich I: Antrieb von Strömungen und Strukturbildungen

Um Energiequellen von Strömungen und Strukturbildungen aufzuklären, wurde zunächst mit einer Analyse von Fachliteratur aus der Geologie bzw. Geophysik (Grotzinger & Jordan, 2017; Clauser, 2016) begonnen. Hierbei wurde ermittelt, dass es zentrale Energiequellen für den Antrieb von Strömungen und Strukturbildungen auf der Erde gibt: Das ist zunächst die Strahlungsenergie der Sonne. Sie führt zu einer Erwärmung der Luft- und Wassermassen, wodurch Meeresströmungen und Wind hervorgerufen werden. Zudem stellt auch die Rotationsenergie der Erde und anderer Himmelskörper eine Energiequelle dar (Lunine, 1997). Diese führt u.a. zu den Gezeiten, da durch die Gravitationskraft als Wechselwirkung zwischen Mond und der Erde Rotationsenergie in Bewegungsenergie des Wassers auf der Erde umgewandelt wird.

3.1.2 Bereich II: Wirkmechanismen bei der Entstehung von Strömungen

Um die fachliche Analyse von Strömungen zu vertiefen, wurde Fachliteratur aus den Bereichen Thermodynamik (z.B. Blundell & Blundell, 2010), Nichtgleichgewichtsthermodynamik (z.B. Demirel, 2014), Kontinuumsmechanik (z.B. Altenbach, 2015) und Strömungslehre (z.B. Wilde, 1978) herangezogen. Hierbei wurden die sogenannten Navier-Stokes-Gleichungen analysiert, mit denen *Newtonsche Fluide* wie Wasser oder Luft beschrieben werden. Bei den Navier-Stokes-Gleichungen handelt es sich um ein System von nichtlinearen Differentialgleichungen, die nach demselben Muster aufgebaut sind und Transportprozesse für Energie, Masse und Impuls beschreiben. In jeder Gleichung hängt die zeitliche Veränderung einer Größe wie z.B. der Temperatur davon ab, wie stark die Temperaturunterschiede in einem Raumbereich sind. Zu den relevanten Größen zählen neben der Temperatur auch die Konzentration (z.B. des Salzgehaltes) und die Geschwindigkeit des betrachteten Fluids. Die Gleichungen sagen aus, dass Gradienten (Unterschiede) von Temperatur, Konzentration und Geschwindigkeit Transportprozesse von Energie, Masse und Impuls auslösen. Die Transportprozesse erfolgen zum einen molekular in Form von Wärmeleitung und Diffusion, zum anderen aber auch konvektiv in Form von Strömungen, also der kollektiven Bewegung von Massepaketen.

Die in den Navier-Stokes-Gleichungen genannten Gradienten kommen dadurch zustande, dass die genannten Energiequellen nicht gleichmäßig auf die Erde einwirken. Die Sonne strahlt nicht überall auf der Erde mit der gleichen Intensität ein. Die Gravitationskraft zwischen Mond und verschiedenen Orten auf der Erde variiert je nach Position der Himmelskörper. Die resultierenden Strömungen sind so gerichtet, dass die Gradienten verringert werden (vgl. Niedrig, 1992, S. 164). Die Strömungen wirken somit ihrer eigenen Ursache entgegen. Es handelt sich bei ihnen also um einen phänomenologischen Ausdruck einer Ausgleichsdynamik. Dies ist theoretisch durch den sogenannten zweiten Hauptsatz der Thermodynamik begründet: Der Ausgleich stellt sich ein, weil der ausgeglichene Zustand statistisch am wahrscheinlichsten ist (Demirel, 2014).

3.1.3 Bereich III: Wirkmechanismen bei der Entstehung von Strukturbildungen

Um die Wirkmechanismen bei der Entstehung von Strukturbildungen aufzuklären, wurde Literatur zur Theorie komplexer Systeme (z.B. Bar-Yam, 2003) analysiert. Da es kein Standardwerk zu Strukturbildungen gibt, wurden zusätzlich Zeitschriftenartikel und Buchkapitel zu spezifischen Strukturbildungsphänomenen analysiert. Es wurden an dieser Stelle allerdings nicht nur an der Küste auftretende Strukturbildungen, sondern auch weitere analysiert, um grundlegende und erklärungs mächtige physikalische Grundideen herausarbeiten zu können, die für Strukturbildungen im Allgemeinen wichtig sind. Zu den analysierten Strukturbildungen zählen:

- Rippel (z.B. Anderson, 1990),
- Dünen (z.B. Herrmann, 2005),
- Wasserwellen (z.B. Besthorn, 2006),

- Kelvin-Helmholtz-Wolken (z.B. Hargreaves, 2003; Smyth & Moum, 2012),
- Priele (z.B. Fagherazzi, 2008),
- Mäander (z.B. Stølum, 1996),
- Wolkenstraßen (z.B. DeAngelis, Post & Travis, 1986),
- Tropische Wirbelstürme (z.B. Emanuel, 2003),
- Eddies (Wasserwirbel) (z.B. Banerjee, 2005).

Bei den Analysen wurden die jeweiligen Erklärungen in den Papers und Buchkapiteln verglichen, und es wurde nach sich wiederholenden Erklärungsmustern gesucht. Kamen ähnliche Erklärungen vor, deutete dies auf ein inhärentes physikalisches Grundprinzip hin.

Bei allen aufgeführten Phänomenen handelt es sich um selbstorganisierte Strukturbildungen, die sich ohne äußeren Einfluss bilden. Dadurch stellen sie das Pendant zu Strukturen wie beispielsweise regelmäßigen Mosaiken oder Barockgärten dar, die vom Menschen strukturiert werden. Als Wirkmechanismen der Selbstorganisation werden in der Theorie komplexer Systeme durchgängig Prozesse der Selbstverstärkung betont: Durch einen Keim (Initiierung der Selbstorganisation) werden Prozesse ausgelöst, die zu einem kollektiven Verhalten und zu einer hohen Systemdynamik führen. Die Selbstverstärkung setzt sich so lange fort, bis das System Zustände erreicht, die sich selbst beschränken. Hierdurch stabilisiert sich das System, und es bildet sich eine zeitlich und räumlich stabile Struktur, wie z.B. die Sandrippel im Wattenmeer. Das Wechselspiel von Selbstverstärkung (positiver Rückkopplung) und Selbstbeschränkung (negativer Rückkopplung) stellt den fachlichen Kern der selbstorganisierten Strukturbildung dar.

Die Mechanismen werden am Phänomen der Prielbildung (Fagherazzi, 2008) verdeutlicht: Läuft das Wasser im Wattenmeer bei Ebbe ab, bleibt im Sand eine fraktale, netzwerkartige Struktur mit Haupt- und Nebenarmen zurück. Der Prozess, bei dem sich der Grad der Verästelung durch Nebenarmbildung erhöht, heißt Avulsion. Zu einer Avulsion kommt es bereits bei kleinsten Störungen, z.B. wegen unterschiedlich dicht gepackten Sandes. Liegt der Sand lockerer, dringt Wasser ein und die Bildung eines Nebenarms wird initiiert. Da sich der Prozess der Avulsion selbstverstärkend fortsetzt (pos. Rückkopplung), gehen vom Nebenarm immer wieder neue Arme ab. Es kommt also zu einer stärkeren Verästelung des Netzwerks. Allerdings sind der Verästelung Grenzen gesetzt. Denn wenn sie zunimmt, steigt das Volumen des transportierten Wassers an. Nach dem Kontinuitätsprinzip (Böge, 2006) wird dadurch die Strömungsgeschwindigkeit in den Armen verringert. Sinkt aber die Strömungsgeschwindigkeit zu stark, kann der Sand nicht mehr in Suspension gehalten werden und lagert sich ab, sodass der Arm verlandet. Dies ist die Hemmung (neg. Rückkopplung) der Netzbildung. Der Grad der Verästelung fluktuiert durch das Zusammenspiel der Entstehung neuer Arme (pos. Rückkopplung) und der dadurch induzierten Verlandung (neg. Rückkopplungen) um einen definierten Wert.

3.1.4 Bereich IV: Komplementarität von Ausgleich und Selbstorganisation

Die fachliche Klärung zeigt, dass die Dynamik an der Küste durch Ausgleich und Selbstorganisation charakterisiert ist. Der Ausgleich bedeutet eine Entropieerhöhung. Selbstorganisation und Strukturbildung stehen hingegen für eine Entropieverringerung. Dies klingt zunächst wie ein Widerspruch, wenn die Aussagen des zweiten Hauptsatzes übergeneralisiert werden. Der zweite Hauptsatz drückt allerdings aus, dass die Entropie in Gänze stets ansteigt. Eine Verringerung der Entropie, also eine Strukturbildung, ist aber möglich, solange sie an anderer Stelle durch eine Entropieerhöhung mindestens kompensiert wird (Penzlin, 2016). Darüber hinaus ist zu unterstreichen, dass Ausgleich und Selbstorganisation komplementäre Prozesse sind, die zu einer Balance führen, die wir als natürliche Strukturen wahrnehmen: Durch die Ausgleichsdynamik entsteht eine Strömung in Wasser und Luft, die granulare Materie in Bewegung versetzt und so Prozesse der Selbstorganisation erst ermöglicht.

3.1.5 Ergebnis: Formulierung von physikalischen Grundideen

Auf Grundlage der fachlichen Klärungen wurden zur Elementarisierung von Strömungen und Strukturbildungen die folgenden physikalischen Grundideen als mögliche Segmente für die didaktische Strukturierung herausgearbeitet. Sie stellen die grundlegenden, abstrahierten physikalischen Ideen im Themenfeld dar, die mit Blick auf die Lernenden zudem vereinfacht wurden. Die Reihenfolge der Grundideen stellt ferner eine Abfolge von lernlogischen Schritten (Sequenzierung) dar; sie sind daher in Gänze das Ergebnis des beschriebenen Dreischritts zur Elementarisierung des Themenfeldes und dienen im rahmenden DBU-Projekt als fachliche Kerne von künftigen phänomenorientierten Exponaten.

(I) Spezifische Energiequellen treiben die Küstendynamik an.

Für die Dynamik in Küstenregionen muss Bewegungsenergie an die dortige Materie übertragen werden. Die Hauptenergiequellen sind die Einstrahlung der Sonne und die Bewegungsenergie der Himmelskörper. Durch die Schwerkraft zwischen den Himmelskörpern wird deren Bewegungsenergie u.a. in Bewegungsenergie des Wassers auf der Erde umgewandelt, sodass z.B. die Gezeiten entstehen.

(II) Die Energiequellen wirken nicht gleichmäßig auf die Materie der Erde ein.

Entscheidend für die Dynamik ist, dass die Energiequellen ungleichmäßig auf die Erde einwirken: Die Sonne strahlt nicht überall gleich ein. Die Gravitationskraft zwischen den Himmelskörpern und der Erde variiert je nach Position der Himmelskörper. Die Folge ist, dass dadurch Unterschiede in der Luft und im Wasser entstehen: Temperaturunterschiede in Folge von unterschiedlicher Erwärmung, Konzentrationsunterschiede (v.a. von Salz) in Folge von unterschiedlicher Verdunstung und Geschwindigkeitsunterschiede in Folge von äußeren Kräften unterschiedlicher Größe.

(III) Die Unterschiede führen zu Strömungen, die Unterschiede wieder ausgleichen.

Liegen entsprechende Unterschiede in Luft und Wasser vor, dann lässt sich eine makroskopische Bewegung beobachten: Strömungen in der Luft und im Wasser entstehen. Diese gerichtete, kollektive Strömungsbewegung ist einer immerwährenden, ungerichteten mikroskopischen Bewegung der Teilchen (Wärmebewegung) überlagert. Die Strömungen wirken dabei ihrer eigenen Ursache entgegen. Sie sind Transportprozesse und bewirken, dass die Unterschiede mit der Zeit verringert, also ausgeglichen werden. Strömungen lassen sich somit als Ausgleichsprozess deuten.

(IV) Strömungen bewirken selbstorganisierte Strukturbildungen, z.B. im Sand.

Zwar unterscheiden sich im Detail die Prozesse der Selbstorganisation bei unterschiedlichen Strukturbildungen; ihnen ist jedoch auf einer bestimmten Abstraktionsebene immer ein Wechselspiel zwischen positiven und negativen Rückkopplungen gemein, die dazu führen, dass zeitlich bzw. räumlich wiederkehrende Muster und Abfolgen entstehen. Positive Rückkopplungen bedeuten eine Selbstverstärkung, negative eine Selbstbeschränkung. Das ist eine Schnittmenge zwischen vielen Strukturbildungen. Durch positive und negative Rückkopplungen lassen sich Phänomene wie Dünen, Rippel, mäandrierende Flüsse, Wirbelstürme und weitere Strukturen beschreiben und entschlüsseln. Bei Dünen besteht die Selbstverstärkung beispielsweise darin, dass an einem Hindernis (z.B. am Strandhafer oder an einer Muschel) mehr Sand hängen bleibt als an anderen Orten. Dadurch bildet sich um das Hindernis eine Sandanhäufung, an der noch mehr Sand hängen bleibt. Die Anhäufung wächst also an (pos. Rückkopplung). Allerdings wächst sie nicht ins Unermessliche, da sie irgendwann so steil wird, dass weiterer Sand

von der Anhäufung wieder herunterrutscht/-rollt. Das System beschränkt sich also irgendwann selbst (neg. Rückkopplung). So stellt sich eine Struktur in Form einer Düne ein, die um eine bestimmte Größe fluktuiert.

(V) Ausgleich und Selbstorganisation bestimmten die Dynamik an der Küste.

Die Selbstorganisation stellt eine Gegenbewegung zum Ausgleich dar, denn der Ausgleich führt auf eine gleichmäßige Verteilung, die Strukturbildungen hingegen auf eine ungleichmäßige Verteilung (z.B. von Sand). Dies klingt zunächst wie ein Widerspruch, wird jedoch dadurch aufgelöst, dass Selbstorganisation und Ausgleich einander bedingen. Erst durch die Dynamik des Ausgleichs entstehen Strömungen, die Sand bewegen und so eine notwendige Bedingung für Strukturbildungen schaffen. Außerdem handelt es sich beim Ausgleich um einen langfristigen Prozess. Kurz- und mittelfristig ist daher eine Selbstorganisation möglich, solange der Ausgleichsprozess insgesamt weiter voranschreitet und so die Ungleichverteilung bei Strukturbildungen kompensiert.

3.2 Erfassen von Lernendenperspektiven

Besuchende einer Ausstellung bringen ihre eigene Perspektive von der physikalischen Dynamik an der Küste ein: Ihre Vorstellungen und ihre Begriffsbildungen beeinflussen, wie sie dortige Exponate wahrnehmen und dargestelltes Wissen verarbeiten (Duit, 2007). Bisher existiert noch keine physikdidaktische Forschung zu den Vorstellungen Lernender von Strömungen und Strukturbildungen im Küstenraum. Um die Perspektiven der Besuchenden zu beforschen, wurden in vorliegender Studie leitfadengestützte und teilstandardisierte Interviews geführt, die sich am Verfahren des problemzentrierten Interviews nach Witzel (1985) orientieren. Es wurden zwei Forschungslinien verfolgt, für die jeweils eine eigene Interviewreihe (A und B) entwickelt und durchgeführt wurde.

3.2.1 Forschungsfragen

Bei Edelmann und Wittmann (2012) sowie Eckes (1991) wird zwischen einem Terminus (Bezeichnung) und einem Begriff unterschieden. Eine Begriffsbildung wird vollzogen, wenn Lernende mit einem Terminus Merkmale verknüpfen. Die Begriffsbildung ist für das Lehren und Lernen von Physik entscheidend, da die Begriffsbildung nach Krabbe, Zander und Fischer (2015) ein zentrales Basismodell des Lernens (Oser & Baeriswyl, 2001) beim Unterrichten von Physik darstellt. Verknüpfen Lernende und Lehrende mit dem gleichen Terminus jeweils unterschiedliche Merkmale, stellt dies eine erhebliche Lernschwierigkeit dar. Da die Termini „Strömung“ und „Struktur“ auch häufig im Alltag eingesetzt werden, wurde zunächst untersucht, welche Merkmale Lernende mit den beiden Termini assoziieren:

- (A1) Welche Merkmale assoziieren Lernende mit dem Terminus „Strömung“?
- (A2) Welche Merkmale assoziieren Lernende mit dem Terminus „Struktur“?

In den Ausstellungen wird üblicherweise das Ziel verfolgt, mit Exponaten Phänomene darzustellen und dabei entsprechendes Wissen anzubieten. Die Verarbeitung der an den Exponaten dargestellten Erklärungen hängt jedoch entscheidend von den Vorstellungen der Besuchenden ab (Widodo & Duit, 2004; Gerstenmaier & Mandl, 1995). Werden die Vorstellungen erfasst, lassen sich lernförderliche und lernhemmende Faktoren identifizieren, die bei der Gestaltung neuer Exponate berücksichtigt werden können, um eine wünschenswerte Wissenskonstruktion zu unterstützen. Deshalb wurde den beiden folgenden Forschungsfragen nachgegangen:

- (B1) Wie erklären Lernende die Entstehung von Strömungen?
- (B2) Wie erklären Lernende die Entstehung von Strukturbildungen?

3.2.2 Forschungsdesign

Interview A

Um die Forschungsfragen A1 und A2 zu beantworten, wurden den Teilnehmenden insgesamt 36 Bilder ausgehändigt, die u.a. Strömungen und Strukturbildungen zeigten. Die Teilnehmenden wurden aufgefordert, Bilder auszuwählen, die für sie Strömungen darstellen. Auf Basis ihrer Auswahl wurde diskutiert, was aus ihrer Sicht für das Vorhandensein einer Strömung erfüllt sein muss. Darüber hinaus wurden die Befragten gebeten, Synonyme, Antonyme und Definitionen für den Terminus zu nennen und diese zu begründen. Sowohl die Begründungen als auch die Zuordnung der Bilder dienten dazu, die Lernenden anzuregen, mit Strömungen assoziierte Merkmale zu verbalisieren. Das Verfahren wurde im Anschluss für den Terminus „Struktur“ wiederholt.

Interview B

Um die Forschungsfragen B1 und B2 zu beantworten, wurde ein weiteres Interview entwickelt. Im Interview standen zwei Versuche (vgl. Abb. 2) im Vordergrund: ein Versuch zur Entstehung einer Strömung und einer zur Entstehung einer Strukturbildung.

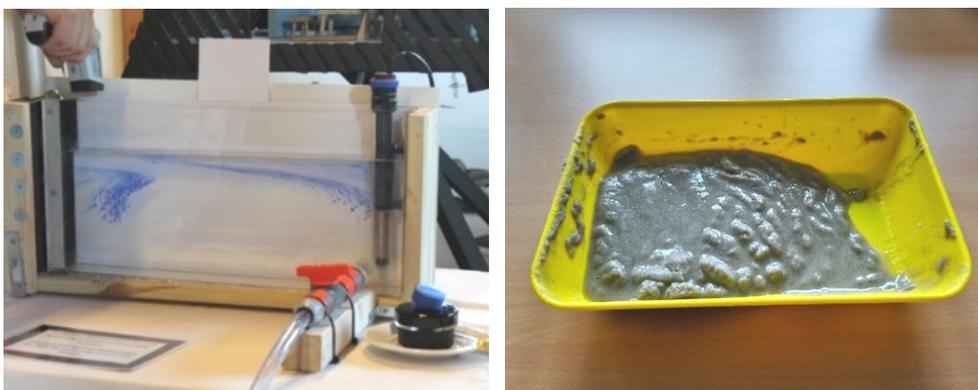


Abbildung 2: Versuche, die im Interview B mit den Befragten durchgeführt wurden.

Mit der linken Versuchsordnung ließ sich eine Strömung erzeugen: An der rechten Seite befand sich eine Heizung, an der linken Seite eine Kühllamelle. Im Betrieb wurde im Wasser eine Temperaturdifferenz erzeugt, durch die eine Konvektionszelle entstand. Durch die Zugabe von etwas Tinte ließ sich die Strömungsbewegung des Wassers sichtbar machen. Da sich bei der Strömungsbewegung die Temperaturdifferenz ausgleicht, ließ sich mit der Apparatur das Prinzip des Ausgleichs (vgl. Kap. 3.1.2) thematisieren. Mit der rechten Versuchsordnung ließ sich eine Strukturbildung im Sand erzeugen: In einer flachen Schale befand sich Sand. Es wurde Wasser hinzugegeben, bis es etwa einen Millimeter über dem Sand stand. Wurde die Schale rhythmisch hin- und herbewegt, entstanden nach kurzer Zeit vielgestaltige Strukturen im Sand. Mit diesem Versuch ließ sich u.a. das Prinzip der Selbstorganisation (vgl. Kap. 3.1.3) thematisieren.

Das Interview wurde in Anlehnung an die POE-Methode von White und Gunstone (1992) strukturiert. Die Abkürzung steht für *Predict* (Erwartung), *Observe* (Beobachtung) und *Explain* (Erklärung): Das Interview begann, indem der bzw. die Versuchsleitende den Befragten die Versuchskomponenten und die Durchführung beschrieb. Die Befragten wurden daraufhin aufgefordert, ihre Erwartungen zu formulieren und zu begründen. Bei der Durchführung der Versuche durch den bzw. die Versuchsleitende**n* sprachen die Interviewten ihre Beobachtungen laut aus. Zuletzt wurden sie gebeten, Erwartungen und Beobachtungen zu vergleichen. Wahrgenommene Abweichungen sollten von ihnen erklärt und die tatsächlichen Beobachtungen herausgestellt werden. Beide

Versuche dienten als Anlass, mit den Befragten über Strömungen und Strukturbildungen zu diskutieren und ihre diesbezüglichen Erklärungsansätze zu untersuchen.

Stichprobe

Da Personen unterschiedlichen Alters außerschulische Lernorte an der Küste aufsuchen, wurden zu den Interviews insgesamt 16 Proband*innen im Alter zwischen 15 und 76 Jahren eingeladen. Sie nahmen jeweils an beiden Interviewteilen in einem einwöchigen Abstand teil. Dadurch bestand die Möglichkeit, sie im zweiten Interview mit ihren Äußerungen aus dem ersten Interview zu konfrontieren, um vertiefende Diskussionen anzuregen. Die zehn jüngsten Proband*innen wurden stets paarweise interviewt, da sich hierdurch erfahrungsgemäß eine höhere Gesprächsbereitschaft ergibt. Mit den verbliebenen sechs Personen fanden Einzelinterviews statt. Somit bildeten fünf Paarinterviews und sechs Einzelinterviews – jeweils für Interview A und Interview B – die Datenbasis.

Im Paarinterview wurde ganz bewusst auf eine gegenseitige Beeinflussung der Proband*innen gesetzt, um vertiefte Diskussionen anzuregen; so wurden u.a. unterschiedliche Erklärungsansätze beider Personen im Paarinterview vom Interviewenden herausgeschält und die Befragten aufgefordert, zur Erklärung des jeweils anderen Stellung zu nehmen. Insgesamt ging es bei der Interviewstudie nicht um einen Vergleich der Vorstellungen der eingeladenen Proband*innen. Im Fokus stand lediglich ein erster Einblick in die Denk- und Erfahrungswelt von Lernenden zur physikalischen Dynamik an der Küste, da es noch keine Vorstellungsforschung in diesem Themenbereich gibt.

3.2.3 Auswertungsverfahren

Alle Interviews wurden aufgezeichnet und Transkripte angefertigt. Zur Auswertung der Interviewstudie wurden die Transkripte einer qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2012) unterzogen. Hierbei wurde das Datenmaterial unter dem Blickwinkel von vier *deduktiven* Hauptkategorien analysiert, die von den vier Forschungsfragen repräsentiert werden. Bei den Hauptkategorien handelt es sich um:

- Merkmale von Strömungen: SG-M
- Merkmale von Strukturen: SR-M
- Erklärungen zu Strömungen: SG-E
- Erklärungen zu Strukturbildungen: SR-E

Zu jeder der Hauptkategorien wurden aus dem vorliegenden Datenmaterial *induktiv* Subkategorien konstruiert, welche die konkreten Merkmale und Erklärungen zu Strömungen bzw. Strukturbildungen aus Lernendensicht repräsentieren. Die qualitative Inhaltsanalyse erfolgte dabei zunächst fallbasiert. Es wurden demnach für jeden Fall Kategorien gemäß folgendem Muster gebildet, die jeweils an Ankerbeispielen festgemacht wurden:

- Merkmale von Strömungen: [Fall]-SG-M_x, [Fall]-SG-M_y, ...
- Merkmale von Strukturen: [Fall]-SR-M_x, [Fall]-SR-M_y, ...
- Erklärungen zu Strömungen: [Fall]-SG-E_x, [Fall]-SG-E_y, ...
- Erklärungen zu Strukturbildungen: [Fall]-SR-E_x, [Fall]-SR-E_y, ...

Im letzten Schritt wurden die herausgearbeiteten Merkmale und Erklärungen zu Strömungen und Strukturbildungen über die untersuchten elf Fälle generalisiert. Hierzu wurden die gebildeten Subkategorien miteinander verglichen. Traten dieselben Merkmale bzw. Erklärungen in mehreren Fällen auf, wurden generalisierte Kategorien (G) gebildet, die jeweils an den Fallkategorien geankert wurden:

- Merkmale von Strömungen: G-SG-M_x, G-SG-M_y, ...
- Merkmale von Strukturen: G-SR-M_x, G-SR-M_y, ...
- Erklärungen zu Strömungen: G-SG-E_x, G-SG-E_y, ...
- Erklärungen zu Strukturbildungen: G-SR-E_x, G-SR-E_y, ...

3.2.4 Forschungsergebnisse (exemplarisch)

Die generalisierten Kategorien wurden zur Beantwortung der Forschungsfragen herangezogen. Im Folgenden sind für die Forschungsfragen exemplarische Ergebnisse und Transkriptauszüge dargestellt.

Forschungsfrage A1

Die Befragten sahen Strömungen als besondere Form einer Bewegung an, die sich durch eine *hohe Menge bzw. Geschwindigkeit* sich bewegenden Wassers auszeichnet. Sie galten daher als gefährlich. Um letzteres zu unterstreichen, berichteten Interviewte von Erlebnissen, bei denen sie beim Schwimmen im Meer in Not geraten sind (G-SG-M₁).

Zudem assoziierten sie mit Strömungen eine gemeinsame Bewegung von Wasser bzw. Luft in eine Richtung. Sie zählten auch Kreisbewegungen zu Strömungen. Das unterstreicht, dass sie Strömungen als *kollektive Bewegungen* auffassen (G-SG-M₂). Beispielzitat: „*Strömung beschreibt die Bewegung von Massen in eine gerichtete Richtung.*“ (Fall 8, Z. 311)

Forschungsfrage A2

Die Befragten sahen Strukturen als einen besonderen Aufbau/Ablauf, der sich dadurch auszeichnet, dass er einmalig ist und *niemals exakt*, sondern nur *in ähnlicher Weise* wieder auftritt. Die Befragten stellten in diesem Zusammenhang eine Analogie zwischen Strukturen und einem Fingerabdruck her (G-SR-M₃).

Zudem charakterisierten die Interviewten Strukturen zum Teil als *regelmäßig* und zum Teil als *unregelmäßig*. Sie gingen jedoch auch so weit, Strukturen gleichzeitig als *regelmäßig* und als *unregelmäßig* zu benennen, obwohl beide Merkmale aus fachlicher Sicht Gegensätze darstellen (G-SR-M₂). Beispielzitat: „*Letztlich ist eine Struktur etwas, das eine unregelmäßige Regelmäßigkeit umschließt*“ (Fall 11, Z. 1449).

Forschungsfrage B1

Bei der Erklärung des Strömungsversuchs zogen die Befragten Temperaturunterschiede heran, die durch die Heizung und das Kühlgerät erzeugt wurden. Wurden sie allerdings aufgefordert, die Wirkmechanismen näher zu beschreiben, argumentierten sie inkonsistent. Zwar vermuteten sie, dass sich durch die Temperaturunterschiede das warme Wasser ausdehnte und das kalte Wasser zusammenzog, sodass eine Bewegung resultierte. Allerdings zogen sie zur Begründung die Dichte heran und erklärten, dass bei einer Verringerung der Wassertemperatur die Dichte generell abnimmt, da ihnen bekannt war, dass Eisblöcke auf Wasser schwimmen (G-SG-E₁).

Obwohl beim durchgeführten Versuch eine Strömung durch Temperaturunterschiede erzeugt wurde, bezogen sich die Lernenden fast ausschließlich auf Strömungen durch äußere Kräfte: Sie sprachen über Strömungen durch Pumpen und Ventilatoren sowie in Flüssen. Um deren Entstehung zu erklären, nutzten sie die Vorstellung der Übertragung von Bewegungen; mit Blick etwa auf Flüsse fokussierten sie darauf, dass sich die verschiedenen Zuflüsse aufaddieren, sodass schließlich ein großer Fluss erzeugt wird (G-SG-E₂). Sie konnten aber nicht begründen, wie ein einzelner Zufluss entsteht. Beispielzitat: „*Ein Fluss fängt ja ganz klein an in der Entstehung. Und dann durch die Zuflüsse usw. kommt immer Bewegung rein. Bis es nachher ein großer Fluss wird. Dann ist Bewegung da, dann ist ein Fluss da*“ (Fall 6, Z. 228).

Forschungsfrage B2

Befragte, die Strukturbildungen als unregelmäßig charakterisierten, vermuteten, dass sie aus Unregelmäßigkeiten in den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Sandkorngröße etc.) resultieren. Mit Blick auf den Strukturversuch in Interview B erläuterten sie, dass die Struktur entsteht, weil die Schale mit den Händen nicht vollständig gleichmäßig zu bewegen sei. Außerdem sei die Größe der Sandkörner ungleichmäßig. Diese Unregelmäßigkeiten spiegelten sich in einer Unregelmäßigkeit der Strukturbildung wider. Auch hier war also die Vorstellung einer Übertragung zu erkennen: Unregelmäßige Ursachen führen zu unregelmäßigen Strukturen. Umgekehrt war aus Lernendensicht keine Strukturierung zu erwarten, wenn die Schale perfekt gleichmäßig bewegt würde (z.B. auf einer Rüttelmaschine) und ausschließlich identische Sandkörner genutzt werden würden (G-SR-E₁).

Ein Übertragungsprinzip zeigte sich auch daran, dass sie sich Strukturen als Abdrücke vorstellten. Da ihnen z.B. Schuhabdrücke als Strukturen bekannt sind, argumentierten sie entsprechend, dass es sich bei Rippelstrukturen im Wattenmeer um einen Abdruck der Wasserwellen handeln müsse (G-SR-E₂). Beispielzitat: „Ja, wenn ich das jetzt einmal mit Bild 5 [Rippel] verbinden würde, dann z.B. so einen Schuhabdruck im Sand. Da entsteht ja auch irgendwie so eine Struktur der Sohle [...] Also bei 5 kann ich mir das vorstellen durch die Wellenbewegung, weil die ja nicht nur oberflächlich ist, sondern auch unter Wasser.“ (Fall 9, Z. 223, 231)

3.3 Didaktische Strukturierung

Um die Ergebnisse der fachlichen Klärung und der empirischen Untersuchung der Lernendenperspektive aufeinander zu beziehen, wurden die generalisierten Kategorien aus den vier Bereichen (Erklärungen sowie Merkmale zu Strömungen bzw. Strukturbildungen) nacheinander mit den Ergebnissen der fachlichen Klärung verglichen. Abweichungen und Übereinstimmungen wurden herausgearbeitet. Ausgehend von diesem Vergleich wurden für alle vier Bereiche Vorschläge entwickelt, wie die fachlichen Inhalte für Lernende aufgearbeitet werden können. Konkret ließen sich die Leitlinien als Bausteine für eine didaktische Strukturierung konkretisieren; in vorliegender Studie waren in allen vier Bereichen insgesamt 37 Leitlinien/Bausteine entwickelt worden. Um das Verfahren beispielhaft zu verdeutlichen, werden im Folgenden vier Leitlinien/Bausteine für eine didaktische Strukturierung vorgestellt. Jeder der folgenden vier Bausteine stammt aus einem der vier genannten Bereiche.

Baustein I: Gefährlichkeit von Strömungen thematisieren

Dieser Baustein fokussiert auf die Begriffsbildung zum Terminus Strömung: Die Befragten assoziierten Strömungen mit großer Menge und hoher Geschwindigkeit des sich bewegenden Wassers und nahmen sie als gefährlich wahr (G-SG-M₁). Hieran ist anzuknüpfen. Aber es muss ebenfalls deutlich gemacht werden, dass es sich auch dann um Strömungen im fachlichen Sinne handelt, wenn die Menge und die Geschwindigkeit so klein sind, dass für den Menschen keine Gefahr besteht. Dass Strömungen im Meer durchaus gefährlich sein können, liegt daran, dass deren Geschwindigkeit oft sehr hoch ist. An die Thematisierung der Gefährlichkeit lässt sich anknüpfen: Strömungen sind auch deswegen gefährlich, weil sie kollektive, gerichtete Bewegungen sind (G-SG-M₂), die in den Prielen des Wattenmeers besonders stark werden können und so Menschen auf Wattwanderungen ohne Wattführer*in des Öfteren in Gefahr bringen.

Baustein II: Ähnlichkeit zur Beschreibung von Strukturen einsetzen

Dieser Baustein fokussiert auf die Begriffsbildung zum Terminus Struktur: Dass die Befragten für dieselbe Struktur sowohl Regelmäßigkeit als auch Unregelmäßigkeit als Merkmal heranzogen (G-SR-M₂), wirkt zunächst widersprüchlich. Vermutlich wurden beide Merkmale genannt, weil natürliche Strukturen (z.B. Rippel) vom Ordnungsgrad her zwischen einer perfekten Struktur (z.B. einem Mosaik) und einem Chaos liegen. Werden Rippelmuster gedanklich mit einem Mosaik verglichen, so ist der Schluss nachvollziehbar, sie seien unregelmäßig. Werden sie hingegen gedanklich mit einem Chaos verglichen, ist nachvollziehbar, wenn Besuchende Rippel als regelmäßig bezeichnen. Regelmäßigkeit und Unregelmäßigkeit sind zwei Extreme und semantisch dementsprechend nicht gut geeignet, um eine Abstufung auszudrücken, die zur Charakterisierung von natürlichen Strukturen gebraucht wird. Hier ist es empfehlenswert, statt von Regelmäßigkeit bzw. Unregelmäßigkeit von *Ähnlichkeit* zu sprechen. Strukturen sind zu sich selbst ähnlich: Sie treten in ähnlichen Zeitintervallen erneut auf (zeitliche Strukturen, z.B. Gezeiten), oder bestimmte Muster/Abfolgen innerhalb der infrage kommenden Struktur treten in ähnlicher Weise erneut auf (räumliche Strukturen, z.B. Rippel). Ähnlichkeit ist semantisch weicher und kann besser die Stellung von natürlichen Strukturbildungen zwischen künstlichen Strukturen und Chaos ausdrücken. Außerdem bietet sich hierdurch die Gelegenheit, an ein weiteres Merkmal anzuknüpfen, das von den Befragten genannt wurde: Strukturen sind aus ihrer Sicht einmalig und kehren nur in *ähnlicher* Form wieder, nicht jedoch exakt (G-SR-M₃).

Baustein III: Strömungen durch äußere Kräfte zuerst thematisieren

Dieser Baustein fokussiert auf Erklärungen zur Entstehung von Strömungen: Da die Befragten Strömungen häufig mit einem Prinzip der Bewegungsübertragung (G-SG-E₂) erklärten, sollten Strömungen durch äußere Kräfte an den Anfang eines Lernangebots gestellt werden. Denn durch wirkende Kräfte wird u.a. Bewegungsenergie von einer Energiequelle auf Wasser bzw. Luft übertragen. Das entspricht der Vorstellung der Lernenden von einer Bewegungsübertragung und liegt fachlich nahe an auftretenden Geschwindigkeitsunterschieden in Fluiden. In einem Lernangebot böte es sich daher an, das Prinzip der Bewegungsübertragung zu einem Prinzip der Übertragung von Bewegungsenergie umzudeuten. Dies wiederum motiviert Fragestellungen nach den Energiequellen für Strömungen, wie sie auch in den bei der fachlichen Klärung herausgearbeiteten physikalischen Grundideen dargestellt sind. Erst dann werden weitere Strömungen, die durch Temperatur- bzw. Konzentrationsunterschiede entstehen, thematisiert (G-SG-E₁).

Baustein IV: Abdruckvorstellungen durch den Henne-Ei-Vergleich widerlegen

Dieser Baustein fokussiert auf Erklärungen zur Entstehung von Strukturen: Da die Lernenden Strukturbildungen häufig mit einer Abdruckvorstellung zu entschlüsseln versuchten (G-SR-E₂), bietet es sich an, zunächst an diese Vorstellung anzuknüpfen und passende Beispiele zu nennen. Hierzu zählen u.a. Reifenspuren oder Schuhabdrücke im Sand. Es muss dann jedoch herausgestellt werden, dass sich natürliche Strukturen wie Rippelmuster oder Priele nicht mit einer Abdruckvorstellung erklären lassen. Dazu werden sie am Beispiel der Rippel mit einem Henne-Ei-Problem konfrontiert: Wären die Rippelmuster tatsächlich ein Abdruck der Wasserwellen, dann stellt sich die Frage, wie die Struktur der Wasserwellen entsteht. Das unterstreicht, dass die Argumentation über Abdrücke die Klärung nicht voranbringt, sondern nur verlagert. Denn irgendwo muss eine erstmalige selbstorganisierte Strukturbildung stattgefunden haben. Hieran lässt sich motivieren, dass bei natürlichen Strukturbildungen der Fokus auf die Wirkmechanismen (Rückkopplungen) gelegt werden muss, um das Konzept der Selbstorganisation aufzubauen.

4 Ableitung von neuen Forschungsaufgaben

Die entwickelten Leitlinien für eine didaktische Strukturierung fußen bisher auf den Perspektiven der Lernenden. Die Leitlinien richten sich allerdings zunächst an die Lernorte, weil die Leitlinien bei der Entwicklung neuer Exponate eingesetzt werden sollen. Deshalb müssen auch deren Perspektiven auf die physikalischen Inhalte, auf die entwickelten Leitlinien und auf deren Genese erfasst werden. Dies ist in Parallelität zu einer didaktischen Strukturierung für die Schule zu sehen, bei der auch die Perspektive von Lehrkräften auf das Unterrichtsangebot einbezogen werden muss, denn sie müssen sich mit der didaktischen Strukturierung identifizieren. Zu diesem Zweck wird eine Interviewreihe mit den pädagogisch Verantwortlichen an außerschulischen Lernorten vorbereitet. Im Interview werden die fachlichen Inhalte zu Strömungen und Strukturbildungen thematisiert, und es werden die Genese sowie die Bedeutung der Leitlinien zur Diskussion gestellt. Es ist Ziel der Interviews, die Perspektive der pädagogisch Verantwortlichen besser kennenzulernen und ihre Akzeptanz gegenüber den vorgeschlagenen Leitlinien für eine didaktische Strukturierung zu erheben, um die Leitlinien weiterzuentwickeln.

Mittelfristiges Ziel ist die Erstellung einer Broschüre, die als Mittel der *fachdidaktischen Wissenschaftskommunikation* dient: Dort werden die Leitlinien für die Gestaltung von Exponaten zur physikalischen Dynamik an der Küste begründet und deren Genese anhand des Vergleichs zwischen der fachlichen Sicht und der Lernendensicht erklärt. Im übergeordneten DBU-Projekt wird die Broschüre schließlich eingesetzt, um zusammen mit den Lernortleitenden und Ausstellungsagenturen neue Ausstellungsexponate zur Dynamik der Küste zu entwickeln, die die physikalische Sicht auf die Küstendynamik mit den bereits an den Lernorten vorhandenen biologischen Perspektiven verzahnen.

Literatur und Internetquellen

- Altenbach, H. (2015). *Kontinuumsmechanik. Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen*. Berlin & Heidelberg: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47070-1>
- Anderson, R.S. (1990). Eolian Ripples as Examples of Self-Organization in Geomorphological Systems. *Earth-Science Reviews*, 29 (1–4), 77–96. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(90\)90029-U](https://doi.org/10.1016/0012-8252(90)90029-U)
- Banerjee, P.K. (2005). *Oceanography for Beginners*. New Delhi et al.: Allied Publishers.
- Bar-Yam, Y. (1997). *Dynamics of Complex Systems*. Boulder, CO: Westview.
- Besthorn, M. (2006). *Hydrodynamik und Strukturbildung. Mit einer kurzen Einführung in die Kontinuumsmechanik*. Berlin & Heidelberg: Springer.
- Bleichroth, W. (1991). Elementarisierung, das Kernstück der Unterrichtsvorbereitung. *Naturwissenschaft im Unterricht. Physik*, 39, 4–11.
- Bliesmer, K. (2016). *Fachdidaktische Analyse von Bildungsangeboten norddeutscher Meeresforschungsinstitute*. Masterarbeit Universität Oldenburg.
- Bliesmer, K. (2020). *Physik der Küste für außerschulische Lernorte. Eine Didaktische Rekonstruktion* (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 306). Berlin: Logos.
- Blundell, S.J., & Blundell, K.M. (2010). *Concepts in Thermal Physics*. Oxford: University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199562091.001.0001>
- Böge, A. (2006). *Technische Mechanik. Statik – Dynamik – Fluidmechanik – Festigkeitslehre*. Wiesbaden: Vieweg.
- Clauser, C. (2016). *Einführung in die Geophysik. Globale physikalische Felder und Prozesse in der Erde*. Berlin & Heidelberg: Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46884-5>

- DeAngelis, D., Post, W.M., & Travis, C.C. (1986). *Positive Feedback in Natural Systems* (Biomathematics, Bd. 15). Berlin, Heidelberg, New York & Tokio: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-82625-2>
- Demirel, Y. (2014). *Nonequilibrium Thermodynamics. Transport and Rate Processes in Physical, Chemical and Biological Systems*. Amsterdam, Oxford & Cambridge: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59557-7.01001-8>
- Duit, R. (2007). Alltagsvorstellungen und Physik lernen. In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik. Theorie und Praxis* (S. 581–606). Berlin & Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34091-1_19
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M., & Parchmann, I. (2012). The Model of Educational Reconstruction – a Framework for Improving Teaching and Learning Science. In D. Jorde & J. Dillon (Hrsg.), *Science Education Research and Practice in Europe. Retrospective and Prospective* (S. 13–37). Rotterdam et al.: Sense Publishers. https://doi.org/10.1007/978-94-6091-900-8_2
- Eckes, T. (1991). *Psychologie der Begriffe*. Göttingen: Hogrefe.
- Edelmann, W., & Wittmann, S. (2012). *Lernpsychologie*. Weinheim: Beltz.
- Emanuel, K. (2003). Tropical Cyclones. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31, 75–104. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.141259>
- Fagherazzi, S. (2008). Self-Organization of Tidal Deltas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105 (48), 18692–18695. <https://doi.org/10.1073/pnas.0806668105>
- Gerstenmaier, J., & Mandl, H. (1995). Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41 (6), 867–888.
- Grotzinger, J., & Jordan, T. (2017). *Press/Siever. Allgemeine Geologie* (7., neu bearb. u. aktual. Aufl.). Berlin & Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48342-8>
- Hargreaves, J.K. (2003). *The Solar-Terrestrial Environment. An Introduction to Geospace – The Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere, and Magnetosphere*. Cambridge: University Press.
- Herrmann, H.J. (2005). Spuren im Sand. Die Physik der Dünen. *Physik Journal*, 61 (8), 57–60.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H., & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3 (3), 3–18.
- Kattmann, U., & Gropengießer, H. (1996). Modellierung der Didaktischen Rekonstruktion. In R. Duit & C. von Rhöneck (Hrsg.), *Lernen in den Naturwissenschaften* (S. 180–204). Kiel: IPN.
- Komorek, M., Fischer, A., & Moschner, B. (2013). Fachdidaktische Strukturierung als Grundlage von Unterrichtsdesign. In M. Komorek & S. Prediger (Hrsg.), *Der lange Weg zum Unterrichtsdesign. Zur Begründung und Umsetzung fachdidaktischer Forschungs- und Entwicklungsprogramme* (Fachdidaktische Forschungen, Bd. 5) (S. 43–63). Münster: Waxmann.
- Krabbe, H., Zander, S., & Fischer, H.E. (2015). *Lernprozessorientierte Gestaltung von Physikunterricht. Materialien zur Lehrerfortbildung* (Ganz in. Mit Ganztage mehr Zukunft, Praxisheft). Münster: Waxmann. Zugriff am 10.12.2019. Verfügbar unter: <http://www.ganzin.de/wp-content/uploads/2015/10/Lernprozessorientierte-Gestaltung-von-Physikunterricht.pdf>.
- Kuckartz, U. (2012). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Weinheim: Beltz.
- Lunine, J.I. (1997). Tidal Heating. In J.H. Shirley & R.W. Fairbridge (Hrsg.), *Encyclopedia of Planetary Sciences* (S. 828). London: Chapman & Hall. https://doi.org/10.1007/1-4020-4520-4_408

- Niedrig, H. (1992). *Physik*. Berlin & Heidelberg: Springer.
- Oser, F., & Baeriswyl, F. (2001). Choreographies of Teaching. Bridging Instruction to Learning. In V. Richardson (Hrsg.), *Handbook of Research on Teaching* (4. Aufl.) (S. 1031–1065). Washington, DC.: American Educational Research Association.
- Penzlin, H. (2016). *Das Phänomen Leben. Grundfragen der Theoretischen Biologie*. Berlin & Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48128-8>
- Roskam, A. (2016). *Fachdidaktische Analyse außerschulischer Repräsentationen der (geo-)physikalischen Dynamik im Wattenmeer und an der Küste*. Masterarbeit Universität Oldenburg.
- Smyth, W.D., & Moum, J.N. (2012). Ocean Mixing by Kelvin-Helmholtz Instability. *Oceanography*, 25 (2), 140–149. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.49>
- Stølum, H.H. (1996). River Meandering as a Self-Organization Process. *Science*, 271 (5256), 1710–1713. <https://doi.org/10.1126/science.271.5256.1710>
- White, R., & Gunstone, R. (1992). *Probing Understanding*. London: Routledge.
- Widodo, A., & Duit, R. (2004). Konstruktivistische Sichtweisen vom Lehren und Lernen und die Praxis des Physikunterrichts. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10, 233–255.
- Wilde, K. (1978). *Wärme- und Stoffübergang in Strömungen*. Darmstadt: Steinkopff. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-72334-6>
- Witzel, A. (1985). Das problemzentrierte Interview. In G. Jüttemann (Hrsg.), *Qualitative Forschung in der Psychologie* (S. 227–255). Weinheim: Beltz.

Beitragsinformationen

Zitationshinweis:

Bliesmer, K., & Komorek, M. (2021). Physikalische Dynamik der Küste für außerschulische Lernorte rekonstruieren. *HLZ – Herausforderung Lehrer*innenbildung*, 4 (2), 51–66. <https://doi.org/10.11576/hlz-2579>

Eingereicht: 21.11.2019 / Angenommen: 20.07.2020 / Online verfügbar: 26.02.2021

ISSN: 2625–0675



© Die Autor*innen 2021. Dieser Artikel ist freigegeben unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen, Version 4.0 Deutschland (CC BY-SA 4.0 de).
URL: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/de/legalcode>

English Information

Title: Educational Reconstruction of Coastal Dynamics for Extracurricular Learning Venues. Using the Model of Educational Reconstruction to Improve Extracurricular Learning

Abstract: Many extracurricular learning venues located near the German Wadden Sea are lacking explanations and models that are suitable for explaining the physical dynamics of the coast. The operators report that visitors ask questions about currents and structure formation phenomena that neither they nor their educational offerings can answer. The present study addresses this deficit. The study is part of an overarching project that is funded by the German Federal Environmental Foundation (DBU). The overarching DBU project aims to develop exhibits for extracurricular learning venues that also represent the physical view on the dynamics of the coast. The present study contributes to this overarching project insofar as an educational reconstruction of the physical dynamics of the coast was carried out, which aimed to formulate educational guidelines. In the first step of the Model of Educational Reconstruction, the concept of elementarization was used to analyze the subject matter structure of coastal dynamics by elucidating the basic

scientific ideas in the subject area. These include processes of equalization and self-organization that explain currents and structure formations in granular matter. In the second step, the learners' conceptions of currents and structure formations on the coast were examined with an interview study. On the one hand, it was investigated what the terms "current" and "structure formation" mean from the learners' viewpoint. On the other hand, it was examined which physical concepts are used by the learners to explain both phenomena. In the third and final step, the basic physical principles were being compared with the learners' perspectives. Based on this comparison, educational guidelines were formulated. In the overarching DBU project, these guidelines serve to support cooperation between science education researchers, operators of the extracurricular learning venues, and the exhibition design agencies to develop new exhibits.

Keywords: Model of Educational Reconstruction, extracurricular learning venues, coastal physics, currents, structure formations, empirical research