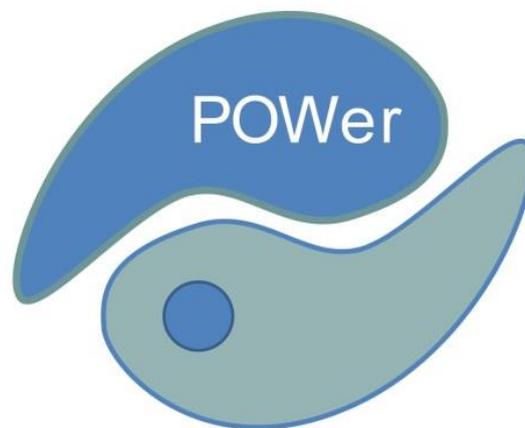


**Klimawandel und die physikalische Dynamik des Wattenmeeres
als Gegenstand schulischer und außerschulischer Umweltbildung**



Physics of the Ocean and the Wadden Sea
educationally reconstructed

**Abschlussbericht über ein Bildungsprojekt,
gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
unter dem Az: 31530/01**

von

Dr. Kai Bliesmer und Prof. Dr. Michael Komorek
AG Didaktik der Physik und Wissenschaftskommunikation

Oldenburg – September 2021

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	31530/01	Referat	Fördersumme	231.650 Euro
Antragstitel		Klimawandel und die physikalische Dynamik des Wattenmeeres als Gegenstand schulischer und außerschulischer Umweltbildung		
Stichworte				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
3 Jahre (+Verlängerung)	01.06.2016	30.06.2021		
Zwischenberichte	30.04.2017	24.03.2018	01.01.2019	
Bewilligungsempfänger	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg Ammerländer Heerstraße 114 26111 Oldenburg		Tel	0441-798-2736
			Fax	0441-798-3201
			Projektleitung	
			Prof. Dr. Michael Komorek	
			Bearbeiter	
			Frau Garbers	
Kooperationspartner	Nationalparkhaus Dangast, Wittbülten, St. Peter Ording, Norddeich, Wangerland Wattenmeer Besucherzentren Wilhelmshaven und Norderney Ausstellungsagentur Kunzberg aus Frankfurt Nationalparkverwaltung Wilhelmshaven Universität Flensburg und Phänomenta Flensburg Hermann-Lietz-Schule Spiekeroog, Inselschule Spiekeroog Neues Gymnasium Oldenburg, Graf-Anton-Günther-Schule Oldenburg			

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Das Bildungsprojekt soll Schüler/innen, Lehramtsstudierenden und interessierten Laien helfen, den sensiblen Lebensraums der Küste und des Wattenmeeres besser zu verstehen und mit ihm künftig nachhaltiger umzugehen. Hierzu wird die Dynamik des Wattenmeeres und des Küstenraumes didaktisch aufbereitet, indem physikalische und geophysikalische Aspekte in die Bildungsangebote von Nationalparkhäusern, Schulen und anderer Bildungseinrichtungen intensiver integriert werden. Um diese Integration zu leisten, werden fachliche Analysen des Themenfelds durchgeführt und es werden empirische Untersuchungen mit Besuchenden durchgeführt, die darauf abzielen ihre Vorstellungen von der Dynamik im Wattenmeer zu beforschen. Beides trägt dazu bei, neue Bildungsangebote zu entwickeln, die sowohl fachgerecht als auch adressatengerecht sind. Flankiert werden die fachlichen Analysen und empirischen Untersuchungen durch neue Exponate, die im Projekt entwickelt werden und die auf physikalische Aspekte im Wattenmeer abzielen. Auch hier wird Besuchendenforschung betrieben, um zu überprüfen, welcher Erkenntnisgewinn bei Besuchenden möglich ist und um Verbesserungen der Exponate zu eruieren.

Darstellung der Forschungsaufgaben und der Ergebnisse

Im Projekt wurden in den letzten zwölf Monaten folgende Arbeitspakete umgesetzt:

Abschluss der Exponatentwicklungen: Durch die Projektmitarbeitende Annika Roskam wurden Ausstellungsexponate zu verschiedenen Themen der physikalischen Dynamik im Wattenmeer entwickelt, die sich insbesondere durch einen phänomenorientierten Zugang, durch Interaktivität und durch die Möglichkeit der selbstgesteuerten Differenzierung auszeichnen. Um die Lernwirksamkeit der entwickelten Exponate zu untersuchen, wurden verschiedene empirische Untersuchungen durchgeführt, sowohl im Feld der Nationalparkhäuser als auch in der Universität durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden im aktuellen Berichtszeitraum vollständig abgeschlossen. Alle Ergebnisse wurden auf Leitlinien abgebildet, die Ausstellungsgestaltenden in einer Broschüre künftig zur Verfügung gestellt werden.

Abschluss der Entwicklung einer Ausstellungskonzeption: Durch den Projektmitarbeitenden Kai Bliesmer wurden die fachlichen Analysen zu physikalischen Aspekten von Küste, Wattenmeer und Ozean sowie die diesbezügliche Vorstellungsforschung mit Besuchenden im Berichtszeitraum abgeschlossen. Die Ergebnisse aus beiden Feldern wurden genutzt, um eine didaktische Rekonstruktion des The-

menfeldes vorzunehmen, wodurch die Sachstrukturen in einer Weise verändert werden, sodass sie sich mehr am Vorwissen, den Vorerfahrungen und den Vorstellungen von Laien orientiert, ohne dabei an fachlicher Angemessenheit einzubüßen. Als Ergebnis der didaktischen Rekonstruktion ist eine auf dem Vorwissen von Besuchenden basierende Ausstellungskonzeption zum Thema Strömungen und Strukturbildungen im Küstenraum entwickelt worden.

Veranstaltung zweier Fachtage (Öffentlichkeitsarbeit): Um die Projektergebnisse zu kommunizieren, wurden zwei Fachtage für die Leitenden und Mitarbeitenden der Nationalparkhäuser und weiterer Bildungseinrichtungen an der Küste veranstaltet. Beim ersten Fachtage standen Strömungen und Strukturbildungen im Vordergrund. Hier wurden fachliche Analysen, empirische Untersuchungen und die entwickelten Exponate vorgestellt und diskutiert. Beim Fachtage sind Bedarfe nach fachdidaktischer Unterstützung beim Thema Ebbe und Flut deutlich geworden. Deshalb wurde ein weiterer Fachtage veranstaltet, der sich explizit dem Phänomen der Gezeiten widmete. Hier wurden verschiedene Erklärungsansätze sowohl auf ihre fachliche Eignung als auch auf ihre Verstehbarkeit für Besuchende hin untersucht. Zusammen wurden daraufhin Vorschläge erarbeitet, wie sich das recht komplexe Thema in außerschulischen Bildungsangeboten fachlich angemessen und verständlich thematisieren lässt.

Entwicklung neuer Exponate, Modelle und Bildungsformate als Reaktion auf Bedarfe: Im Zuge der Zusammenarbeit mit den Bildungsakteuren der Region sind verschiedene Bedarfe nach neuen Exponaten und Bildungsangeboten aufgetreten, auf die im Zeitraum der Berichtslegung reagiert wurde. So ist ein Exponat zur *Animal Navigation* entstanden, das künftig im Rahmen der sehr bekannten und beliebten Zugvogeltage eingesetzt wird. Ferner wurde ein Konzept für eine physikalische Wattwanderung entwickelt und evaluiert, was insofern nötig war, als sich die bisherigen Bestrebungen zur Integration physikalischer Inhalte lediglich auf die Ausstellungen der Nationalparkhäuser bezogen, ein großer Teil der dortigen Bildungsarbeit aber auch direkt im Wattenmeer stattfindet. Zuletzt ist ein Planetenmodell entstanden, das die Bewegung des Erde-Mond-Systems darstellt und dazu beiträgt, die Gezeiten besser verstehen zu können. Es soll künftig in die Ausstellungsneugestaltung des Wattenmeer Besucherzentrums in Wilhelmshaven integriert werden. Auch eine diesbezügliche Schautafel wurde entwickelt und evaluiert.

Zusammenarbeit mit der Ausstellungsagentur Kunzberg aus Frankfurt: Da eine intensive Zusammenarbeit mit dem Wattenmeer Besucherzentrum in Wilhelmshaven besteht und die dortige Ausstellung momentan vollständig überarbeitet wird, konnte eine Zusammenarbeit mit zuständigen Ausstellungsagentur Kunzberg aus Frankfurt etabliert werden. Zunächst nur auf den Ausstellungsbereich der Gezeiten beschränkt, erstreckt sich die Zusammenarbeit mittlerweile auch auf physikalische Inhalte im Küstenraum in Form von Strömungen und Strukturbildungen. Momentan wird darüber beraten, inwieweit diese beiden Themen sich in zu planende interaktive Experimentierstationen einbinden lassen.

Vorträge, Publikationen sowie studentische Qualifikationsarbeiten: Bei Vorträgen und auf Postern ist das Projekt national und international vielfältig vorgestellt worden: ESERA-Tagungen (European Science Education Research Association) in Bologna und Porto, GDGP-Tagungen (Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik), DPG-Tagung in Würzburg, Inter.Aktion-Tagung in Heilbronn, Workshops im Promotionsprogramm GINT (Lernen in informellen Räumen) zum außerschulischen Lernen. Im Rahmen des Projekts sind mittlerweile als 29 Bachelor- und Masterarbeiten abgeschlossen worden oder befinden sich noch in der Bearbeitung.

Broschüre: Die Ergebnisse des Projekts werden in einer Broschüre gebündelt dargestellt, die an die Bildungsakteure in Küstenregionen ausgehändigt wird. Neben einer reinen Präsentation von Ergebnissen sollen hier interaktive Elemente zum Tragen kommen.

Fazit

Die Umsetzung des Projekts fand wie geplant statt, größere Abweichungen waren nicht zu verzeichnen. Auf Bedarfe der Bildungseinrichtungen wurde reagiert, sodass neue Exponate, Modelle und Bildungsformate entwickelt worden sind. Die Öffentlichkeitsarbeit wurde intensiviert. Die Leitenden und Mitarbeitenden der Bildungseinrichtungen nehmen verstärkt Kontakt mit den Projektmitarbeitenden auf, um sich hinsichtlich Physik im Kontext Küste und Watt beraten zu lassen. Eine Zusammenarbeit mit einer Ausstellungsagentur wurde etabliert, um in die Ausstellung des Wattenmeer-Besucherzentrums neben der szenografischen Kompetenz auch physikdidaktische Kompetenzen einfließen zu lassen.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Darstellung der Arbeitsschritte, angewandten Methoden und Ergebnisse	4
2.1	Schwerpunkt A: Ist-Zustand und Bedarfe zu Ausstellungen im Kontext Küste und Watt	4
2.1.1	Befragung von pädagogischem Personal	4
2.1.2	Befragung von Lehrkräften an Schulen.....	5
2.1.3	Kooperations- und Beratungsgespräche.....	6
2.1.4	Konsequenzen für das Projekt.....	7
2.2	Schwerpunkt B: Fachdidaktische Aufbereitung: Strömungen und Strukturbildungen	7
2.2.1	Fachliche Klärung.....	8
2.2.2	Vorstellungsforschung	11
2.2.3	Fachdidaktische Leitlinien.....	13
2.2.4	Präsentation auf einem Fachtag	14
2.2.5	Anwendung der Leitlinien: Konzeption einer physikalischen Wattwanderung.....	16
2.3	Schwerpunkt C: Fachdidaktische Aufbereitung: Gezeiten	18
2.3.1	Fachliche Klärung.....	18
2.3.2	Vorstellungsforschung	22
2.3.3	Fachdidaktische Leitlinien.....	25
2.3.4	Präsentation auf einem Fachtag	28
2.3.5	Anwendung der Leitlinien: Konzeption einer Erklärtafel	32
2.4	Schwerpunkt D: Entwicklungsforschung mit Exponaten zu den aufbereiteten Themen	34
2.4.1	Erarbeitung eines fachdidaktischen Ausstellungskonzepts.....	34
2.4.2	Entwicklung von Exponat-Prototypen und erste Erprobung.....	35
2.4.3	Weiterentwicklung der Exponate und Feldstudie im NPH Dangast	38
2.4.4	Erarbeitung von Begleitmaterial und Analyse fremder Ausstellungen	41
2.4.5	Weiterentwicklung der Exponate, Laborstudie an der Universität.....	41
2.4.6	Finalisierung der Exponate und Feldstudie im NPH Norddeich	42
2.4.7	Neuentwicklung eines Exponats zu Prielten	44
2.4.8	Neuentwicklung eines Exponats zur Himmelsmechanik bei Gezeiten.....	46
2.4.9	Neuentwicklung eines Exponats zur Orientierung von Zugvögeln.....	48
2.4.10	Generalisierende Auswertung von Befragungen im Feld und im Labor.....	50
2.4.11	Beratung einer Ausstellungsagentur zum Thema Gezeiten	51
2.4.12	Fazit und Outcome	52
2.5	Schwerpunkt E: BNE-Bildungsexkursionen	53
2.5.1	Unterrichtsexkursion 2016	53
2.5.2	Unterrichtsexkursion 2017	53

2.5.3	Unterrichtsexkursion 2018	56
3	Fazit	59
4	Verzeichnisse	VI
4.1	Projektbezogenes Literaturverzeichnis	VI
4.1.1	Abschlussarbeiten	VI
4.1.2	Vorträge und Poster	VII
4.1.3	Publikationen mit Projektbezug	VIII
4.2	Generelles Literaturverzeichnis	IX
4.3	Abbildungsverzeichnis	XI
4.4	Tabellenverzeichnis	XII
5	Anhang (Broschüre)	XIII

Projektmitarbeiter:innen:

Prof. Dr. Michael Komorek, Dr. Kai Bliesmer & Dr. Annika Roskam

1 Einleitung

Die Küstenregionen der Erde (definiert als 100 km breiter Küstenstreifen) bilden den Lebens- und Wirtschaftsraum für etwa die Hälfte der Menschheit (Maribus, 2017). Gleichzeitig reagieren die Küsten besonders sensibel auf Klimaveränderungen und Umweltverschmutzungen. Das vorliegende Bildungsprojekt soll Schüler:innen, Lehramtsstudierenden und interessierten Laien helfen, den sensiblen Lebensraum der Küste und des Wattenmeeres besser zu verstehen und mit ihm künftig nachhaltiger umzugehen. Hierfür werden sowohl die Schule als auch außerschulische Lernorte nutzbar gemacht. Das Projekt stellt mit seiner netzwerkartigen Struktur einen Beitrag zur Bildung für eine nachhaltige Entwicklung dar (Michelsen & Fischer, 2016; United Nations General Assembly, 2003). Es werden dabei zwei Grobziele verfolgt.

Physikalische Dynamik im Wattenmeer aufbereiten. Ein zentrales Ziel des Projekts ist es, einen "weißen Fleck" auf der Landkarte der didaktischen Aufbereitung der Dynamik des Wattenmeeres und des Küstenraumes auszufüllen, indem physikalische und geophysikalische Aspekte in die Bildungsangebote von Nationalparkhäusern, Schulen und anderer außerschulischer Bildungseinrichtungen stärker integriert und repräsentiert werden. Bisher dominiert eine biologische Sicht auf das Wattenmeer, insbesondere an den dortigen außerschulischen Lernorten. Es braucht jedoch einen interdisziplinären Zugang, denn nur zusammen mit der physikalischen, chemischen und biologischen Perspektive lassen sich die vorherrschenden systemischen Sachverhalte (Bar-Yam, 1997) verständlich machen. Im Projekt werden deshalb bisher randständig thematisierte physikalische Aspekte herausgearbeitet, mit den weiteren naturwissenschaftlichen Perspektiven vernetzt und für Bildungszwecke aufbereitet. Im Fokus stehen hierbei außerschulische Bildungseinrichtungen, also Orte des non-formalen Lernens. Denn hierdurch lassen sich neben Schüler:innen auch ältere interessierte Laien erreichen, die keine formalen Lernorte mehr besuchen. Der Schulunterricht steht insofern nur mittelbar im Fokus, als die Einbettung von außerschulischem Lernen zum Themenbereich Küste, Watt und Ozean in den Fachunterricht durch die Entwicklung und Bereitstellung von passenden Lernmaterialien unterstützt wird.

BNE-Bildungsexkursionen realisieren. Ein weiteres Ziel des Projekts ist es, konkrete interaktive Bildungsprojekte zwischen Nationalparkhäusern, Schulen, Instituten der Küstenforschung und der Universität umzusetzen, zu evaluieren und weiterzuentwickeln. Bildung für nachhaltige Entwicklung fungiert diesbezüglich als konzeptionelle Rahmung. Zielgruppen der Bildungsprojekte sind sowohl Schüler:innen als auch Lehramtsstudierende: Schüler:innen werden für nachhaltige Entwicklung und den Schutz des Wattenmeeres sensibilisiert. Gleichzeitig erarbeiten sie sich biologisches, chemisches und physikalisches Wissen. So erleben sie die fachlichen Inhalte als bedeutsam und nützlich, um sich mit Fragen der nachhaltigen Entwicklung und inhärenter *ill-defined problems* (Raami, 2019) beschäftigen zu können. Lehramtsstudierende lernen das Konzept der Bildung für eine nachhaltige Entwicklung kennen und werden geschult, in ihrem künftigen Unterricht über den Tellerrand ihres eigenen Fachs zu blicken, indem sie (interdisziplinäre) Kontexte aus der Lebenswelt ihrer Schüler:innen für das Lernen von Naturwissenschaften und nachhaltiger Entwicklung heranziehen.

Um die beschriebenen Ziele zu erreichen, sind insgesamt die folgenden fünf Arbeitsschwerpunkte formuliert bearbeitet worden. Diese Arbeitsschwerpunkte strukturieren den vorliegenden Abschlussbericht. Sie werden nachfolgend kurz beschrieben und sind ferner ausdifferenziert auf der nächsten Seite in Abb. 1 dargestellt.

Schwerpunkt A Ist-Zustand und Bedarfe erheben

Zu Beginn des Projekts wurden Befragungen durchgeführt, Literaturrecherchen betrieben und Kooperationsgespräche (s. Tab. 1) geführt, um mehr über den Stand und die Bedarfe hinsichtlich Ausstellungen im Kontext Wattenmeer und Küste in Erfahrung zu bringen. Außerdem sollte zu allen Beteiligten von Anfang an ein vertrauensvolles Arbeitsverhältnis aufgebaut werden, indem sich das Projekt an deren Wünsche und Bedarfe orientiert.

Schwerpunkt B Fachdidaktische Aufarbeitung zu Strömungs- und Strukturbildungsphänomenen

Aus Schwerpunkt A wurden notwendige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten abgeleitet: Zum einen wurde theoretische Vorarbeit geleistet, indem grundsätzliche physikdidaktische Analysen zu physikalischen Phänomenen an der Küste und im Wattenmeer in Form von Strömungen und Strukturbildungen betrieben wurden. Außerdem galt es, diesbezügliche Vorstellungen und Konzepte von Laien empirisch zu untersuchen, um Ansatzpunkte für die Entwicklung von verständlichen, zielgruppenspezifischen Materialien und Erklärungen zur Physik an der Küste und im Wattenmeer herauszuschälen zu können. In diesem Schwerpunkt wurde eine Dissertation (Bliesmer, 2020) abgeschlossen.

Schwerpunkt C Fachdidaktische Aufarbeitung zum Phänomen der Gezeiten

Bei den Entwicklungsarbeiten im Schwerpunkt B ist aufgefallen, dass die Kooperationspartner:innen den Bedarf nach einer fachdidaktischen Aufarbeitung rund um das Thema Gezeiten verspüren. Denn in diesem Themenfeld kursieren viele Materialien, die den Anspruch nach fachlicher Korrektheit und gleichzeitiger Verständlichkeit nicht einlösen können. Dem Bedarf der Partner:innen ist nachgekommen worden. Die Aufarbeitung ist hierbei analog zu Schwerpunkt B vollführt worden.

Schwerpunkt D Bau und Erprobung von Exponaten zur Physik der Küste und des Wattenmeers

Zu Strömungs-, Strukturbildungs- sowie Gezeitenphänomenen sind Exponate als Prototypen gebaut worden, weil empirische Untersuchungen dazu nötig waren, wie Menschen in Ausstellungen mit physikalisch orientierten Exponaten interagieren, wie und woran genau sie dort Wissen aufbauen, wo Probleme oder Missverständnisse bestehen und wie sich diese verringern lassen. Die Forschungsergebnisse sind eingesetzt worden, um die Exponate zu verbessern. Danach wurden sie abermals erprobt, bis mit ihnen wünschenswerte Lehr-Lern-Prozesse angeregt werden konnten. In diesem Schwerpunkt wurde eine Dissertation (Roskam, 2020) abgeschlossen.

Schwerpunkt E Realisation von interaktiven BNE-Bildungsexkursionen

In den Jahren 2016, 2017 und 2018 sind insgesamt drei umfangreiche BNE-Bildungsexkursionen durchgeführt worden. Kooperationen bestanden hierbei mit dem Nationalparkhaus Wittbülten, der Hermann-Lietz-Schule auf Spiekeroog sowie dem Institut für die Chemie und Biologie des Meeres ICBM. Diese setzten einen Startpunkt für ein "Bildungsnetzwerk Wattenmeer und Küstenraum", das non-formale mit formaler (schulischer und universitärer) Bildung vernetzt. Im Projektzeitraum sind als weitere Schulen das Neue Gymnasium Oldenburg und die Graf-Anton-Günther-Schule Oldenburg in das Projekt einbezogen worden.

Physikalische Dynamik des Wattenmeeres
und Bildungsaktivitäten mit Schulen und außerschulischen Bildungseinrichtungen

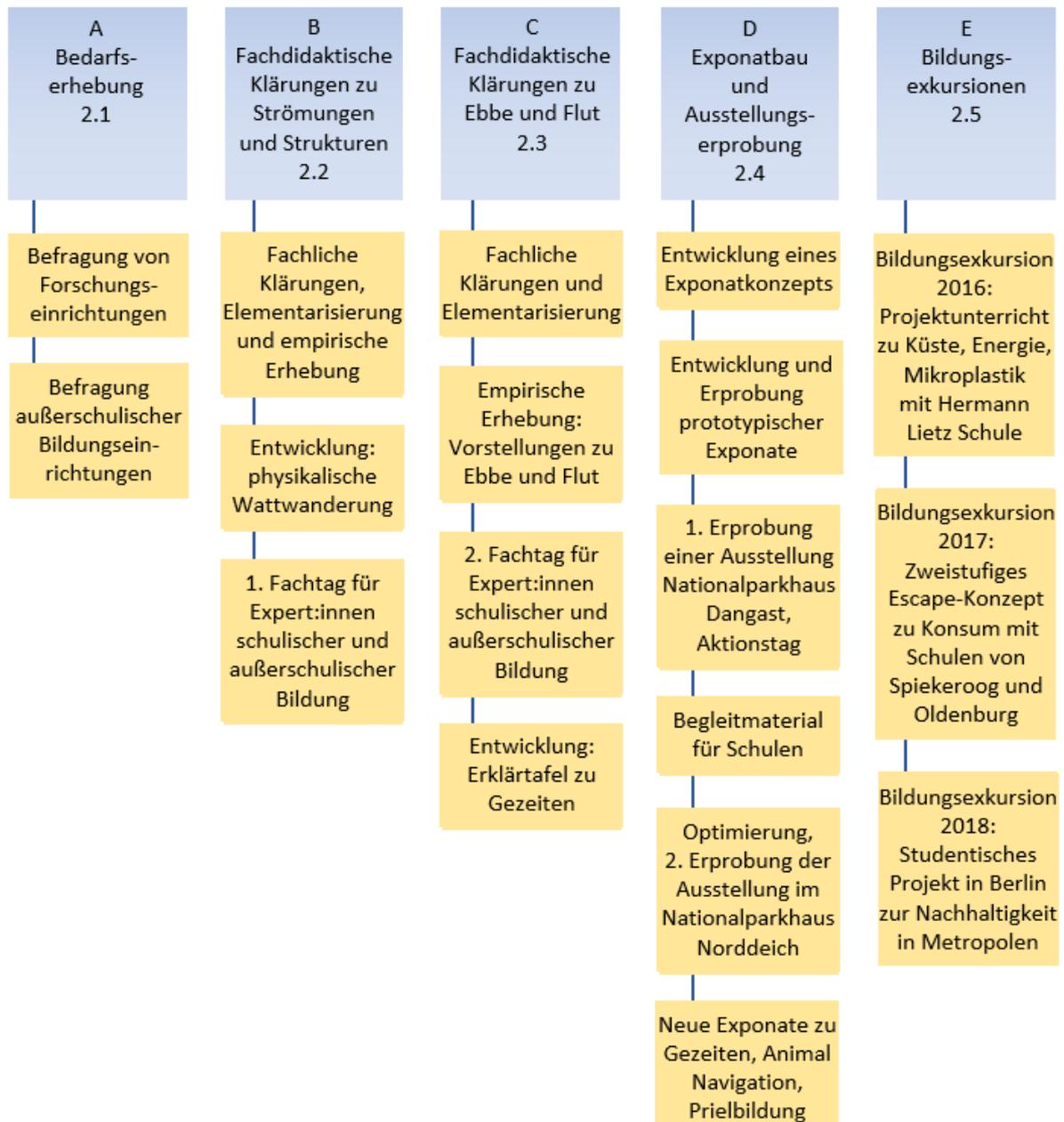


Abb. 1. Projektschwerpunkte und resultierende Arbeitspakete als Organigramm

2 Darstellung der Arbeitsschritte, angewandten Methoden und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Arbeitsschritte, angewandten Methoden und Ergebnisse je nach Arbeitsschwerpunkt beschrieben. Sie bilden daher die Unterkapitel. Es sei angemerkt, dass die theoretischen und empirischen Ergebnisse aus allen Arbeitsschwerpunkten stets dazu eingesetzt wurden, Öffentlichkeitsarbeit zu betreiben: Fachtage, Vorträge und Beratungen zu den Inhalten des Projekts fanden statt. Informationsmaterialien wurden entwickelt. Diese Produkte sollen alle Lehrenden an außerschulischen Lernorten dabei unterstützen, neben der biologischen Sicht auch die physikalische Sicht auf Küste und Watt an ihren Orten zu thematisieren bzw. wahrnehmbar zu machen.

2.1 Schwerpunkt A: Ist-Zustand und Bedarfe zu Ausstellungen im Kontext Küste und Watt

Zu Beginn des Projekts bestand die Aufgabe darin, das Entwicklungsfeld des regionalen außerschulischen Lernens zum Thema Küste und Watt aufzuschließen, Kooperationspartner zu gewinnen und in Erfahrung zu bringen, welche Bedarfe und Ideen hinsichtlich einer Weiterentwicklung non-formaler Angebote bestehen. Im August 2016 sind Annika Roskam und Kai Bliesmer für das Projekt eingestellt worden, die diese Befragungen durchführten. Das Projekt erhielt den Namen POWER (Physics of the Ocean and the Wadden Sea – educationally reconstructed; der Zusatz verweist auf das genutzte Model of Educational Reconstruction (Duit, Gropengießer, Kattmann, Komorek & Parchmann, 2012).

2.1.1 Befragung von pädagogischem Personal.

Zunächst sind in zwei Befragungsrunden Verantwortliche an verschiedenen außerschulischen Lernorten im Rahmen von Experteninterviews (Bogner, Littich & Menz, 2005) befragt worden. Zu diesen Orten gehörten zum einen Nationalparkhäuser und -zentren, sowie Regionale Umweltbildungszentren (RUZ). Aus dieser Befragung ist eine Masterarbeit mit dem Titel "Fachdidaktische Analyse außerschulischer Repräsentationen der (geo-)physikalischen Dynamik im Wattenmeer und an der Küste" (Roskam 2016) hervorgegangen. Zum anderen wurden Verantwortliche aus Einrichtungen der Meeresforschung mit Abteilungen für Öffentlichkeitsarbeit in Niedersachsen, Hamburg und Schleswig-Holstein interviewt. Hieraus ging ebenfalls eine Masterarbeit hervor, die den Titel "Fachdidaktische Analyse der Bildungsangebote deutscher Meeresforschungsinstitute" (Bliesmer 2016) trägt. Aus den Befragungen folgt zusammenfassend, dass sich außerschulische Lernorte eine physikdidaktische Unterstützung wünschen, um fachphysikalische Aspekte stärker als bisher in ihre Angebote zu integrieren. In den Abbildungen 1 und 2 sind die Forschungsfragen sowie die Ergebnisse der Befragungen zusammenfassend aufgeführt.

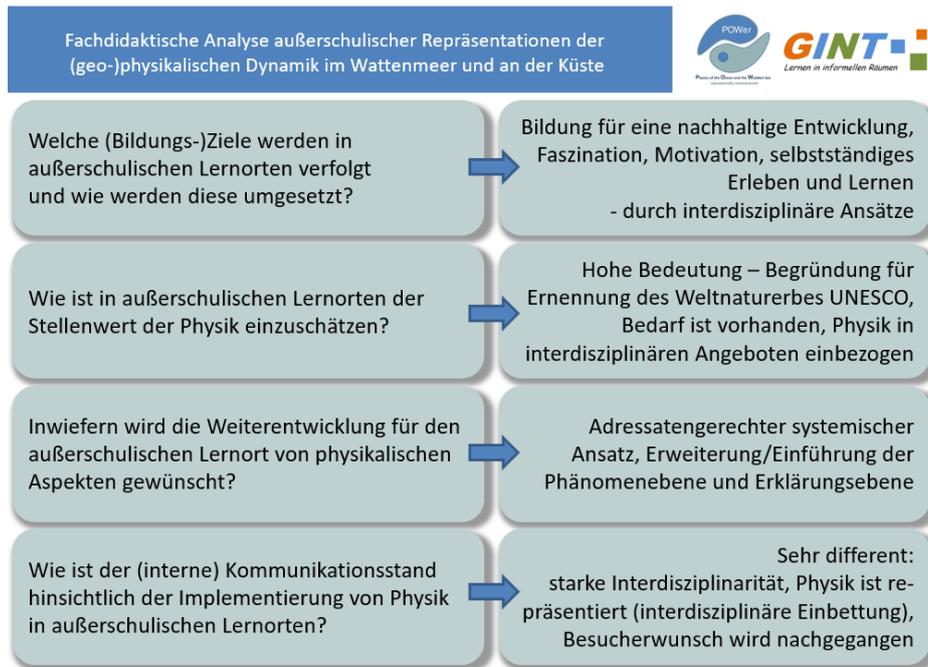


Abb. 2. Forschungsfragen und Ergebnisse der Befragungsstudie von Roskam (2016) Links: Forschungsfragen; Rechts: Ergebnisse (eigene Darstellung).



Abb. 3. Forschungsfragen und Ergebnisse der Befragungsstudie von Bliesmer (2016). Links: Forschungsfragen; Rechts: Ergebnisse (eigene Darstellung)

2.1.2 Befragung von Lehrkräften an Schulen.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit (Beus, 2017) wurden Lehrkräfte nach ihren Bedarfen an physikalischen Inhalten und Exponaten in Ausstellungen befragt. Es konnte mit Unterstützung des *Common Wadden Sea Secretariat* ein umfangreicher Mail-Verteiler mit Lehrkräften genutzt werden. Es wurde untersucht, welche physikalischen Phänomene Lehrkräfte als so wichtig empfinden, dass sie sich diese in einer Ausstellung zum Thema Küste, Watt und Ozean wünschen. Phänomene im Watten-

meer, Bewegungen von Sand, Ebbe und Flut etc. wurden dabei besonders thematisiert. Es zeigt sich, dass die Befragten einen physikbezogenen Bedarf äußern, aber sie die Besuche in den Bildungseinrichtungen durchaus auch zu anderen Zwecken nutzen: Die Gestaltung eines Ausflugs oder die Entwicklung von Interessen sind von großer Bedeutung. Die Befragung hat wichtige Hinweise für die weitere Entwicklung des Ausstellungskonzepts geliefert, denn es ist nun klarer, dass Lehrkräfte sowohl auf der Ebene von Interessensentwicklung/Spaß/Schulfreizeit als auch hinsichtlich fachlicher und überfachlicher Aspekte anzusprechen sind, wenn man ihnen physikorientierte Ausstellungselemente z. B. mittels Begleitmaterialien nahebringen möchte. Allein fachliche Gesichtspunkte sind nie ausschlaggebend für den Besuch eines außerschulischen Lernortes.

2.1.3 Kooperations- und Beratungsgespräche.

Im Rahmen dieses Arbeitsschwerpunkts fanden die folgenden Kooperationsgespräche (Tab. 1) statt:

Tab. 1. Kooperationsgespräche im Schwerpunkt A mit Datum, Adressat und Inhalt

Datum	Lernort	Inhalt
Dez. 2016	Wattenmeer Besucherzentrum auf Norderney (Frau Wolters)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Vermittlung physikal. Aspekte in Ausstellungen ○ Interesse an einer Kooperation zur Weiterentwicklung von physikalischen Exponaten
Dez. 2016	Nationalparkhaus in Dangast (Herr Klein)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Vermittlung physikal. Aspekte in Ausstellungen
Feb. 2017	Europa Universität Flensburg (Prof. Dr. Heering, Herr Dr. Kuipel)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Diskussion des Exponat- und Ausstellungskonzepts ○ Weiterentwicklungen: Zielgruppen definieren, alle zehn Jahre findet in Ausstellungen eine Umstrukturierung statt und dies wird als positive neue Herausforderung wahrgenommen. Ausstellungsmacher achten auf äußerliche Faktoren und nur indirekt auf die didaktischen Forderungen
Feb. 2017	Phänomenta Flensburg (Herr Dr. Kuipel und Herr Englert)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Wesentliche Faktoren für den Bau und die Erstellung von Exponaten bei den Ausstellungsmachern: Ästhetik, Robustheit etc. (didaktische Überlegungen sind eher oberflächlich) ○ Mögliche Kooperation mit der Phänomenta
Feb. 2017	Nationalparkhaus Schutzstation St. Peter Ording (Frau Gettner)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Vermittlung physikal. Aspekte in Ausstellungen ○ Umsetzungsbeispiele für physikalische Aspekte in der Ausstellung in St. Peter Ording ○ Formulierung des Interesses an physiknahen Aspekten und systemischen Ansätzen ○ Beratung bei der Planung einer Außenfläche, konkreter Kooperationswunsch; Entstehungsgeschichte der Ausstellung (Zusammenarbeit mit einer Agentur, Planungsgruppe mit Beteiligten aus unterschiedlichen fachlichen Richtungen)
Feb. 2017	Nationalparkverwaltung (Frau Hofmeister, Herr Rammel) und Nationalparkhaus Dangast (Herr Klein), Besucherzentrum Wilhelmshaven (Herr Staves, Herr	<ul style="list-style-type: none"> ○ Kooperationsvorhaben durch die direkte Kooperation mit ausgewählten Häusern bzw. Zentren des Nationalparks ○ Direkte Kooperation mit der Nationalparkverwaltung, ein übergeordnetes Ausstellungskonzeptes betreffend ○ Weitere Möglichkeiten der Kooperation ○ Diskussion des vorhandenen Ausstellungskonzepts "Strömungen auf verschiedenen Größenskalen"

	Schockemöhle)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Realisierung konkreter Exponate ○ Inhaltlich relevante Schwerpunkte für die Vermittlung seitens der Nationalparkverwaltung ○ Neue Schwerpunktsetzung: Dynamik des Wattenmeeres
März 2017	Wattenmeer Besucherzentrum Wilhelmshaven (Frau Dr. Köhler, Herr Staves, Herr Schockemöhle)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Vermittlung physikal. Aspekte in Ausstellungen ○ Es steht eine Ausstellungserneuerung an ○ Interesse an einer Kooperation zur Weiterentwicklung von physikalischen und systemischen Exponaten ○ Betonung der Abgrenzung zu anderen Ausstellungen
2017-2021 durchgängig	Wattenmeer Besucherzentrum Wilhelmshaven und Ausstellungsagentur	<ul style="list-style-type: none"> ○ Beratung hinsichtlich der Neustrukturierung der physikalischen Anteile der Ausstellung im Besucherzentrum; Beratung insbesondere der Agentur und der Werkstätten, Bau und Erprobung prototypischer Exponate zum Thema Gezeiten

2.1.4 Konsequenzen für das Projekt.

Die Befragungen, empirischen Erhebungen und Kooperationsgespräche waren zielführend hinsichtlich der Frage, welche Bedarfe der fachlichen Aufarbeitung physikalischer Themen bei Wissenschaftler:innen, Ausstellungshäusern und Lehrkräften bestehen und welche Vorstellung hinsichtlich einer didaktischen Umsetzung existieren. Diese Innensicht zu kennen und insbesondere auch mit den Bildungspraktiker:innen in Kontakt zu treten, hat alle weiteren Schwerpunkt B, C und D maßgeblich mitbestimmt. Insgesamt hat sich ein großes Interesse an der Integration der physikalischen Perspektive im Rahmen grundsätzlich als interdisziplinär gewünschter Zugänge gezeigt. Gleichzeitig wurde deutlich, dass das diesbezügliche Vorstellungsvermögen und die Erfahrung bei fast allen Gesprächspartner:innen fehlten, wie dies umzusetzen sei. Deshalb haben wir uns im Projekt dazu entschieden, entsprechende Inhalte zur Integration der physikalischen Perspektive sowohl fachgerecht als auch adressatengerecht aufzubereiten, das Gelingen einer solchen Aufbereitung empirisch zu untersuchen und zugleich unsere Ergebnisse durch Kooperationsgespräche und Fachtage mit den außerschulischen Bildungsakteuren zu kommunizieren.

2.2 Schwerpunkt B: Fachdidaktische Aufbereitung: Strömungen und Strukturbildungen

Wann immer es gilt, Inhalte für Laien zugänglich zu machen, bedarf es einer fachdidaktischen Aufarbeitung. Diese umfasst zum einen eine Analyse der zu thematisierenden Fachinhalte, was als Elementarisierung (Bleichroth, 1991) bezeichnet wird. Die Elementarisierung ist eine vertiefte fachliche Klärung, bei der die zentralen fachlichen Grundprinzipien (Elementaria) aus der Fachliteratur herausgearbeitet, die benötigt werden, um den erwählten Inhaltsbereich entschlüsseln zu können. Zum anderen bedarf es bei der fachdidaktischen Aufbereitung – einer systemisch-konstruktivistischen Pädagogik (Reich, 2005) folgend – einer empirischen Untersuchung über das Vorwissen, die Vorstellungen und Assoziationen von Laien zum interessierten Themengebiet. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Elementarisierung und der empirischen Untersuchung systematisch miteinander verglichen, um aus dem Vergleich fachdidaktische Strategien für die Vermittlung ableiten zu können (sog. Didaktische Strukturierung). Diese didaktische Strukturierung leitet schlussendlich die Ausgestaltung von neuen Lernmaterialien und ist Ausdruck des Bestrebens, dass Materialien sowohl fachlich angemessen zu gestalten als auch auf die kognitiven Fähigkeiten und das Vorverständnis von Laien abzustimmen sind. Ein solches Vorgehen wird durch das *Model of Educational Reconstruction* (Duit, Gropengießer, Kattmann, Komorek & Parchmann, 2012) beschrieben. Das Prinzip dieser drei eng miteinander verzahnten Arbeitsbereiche ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

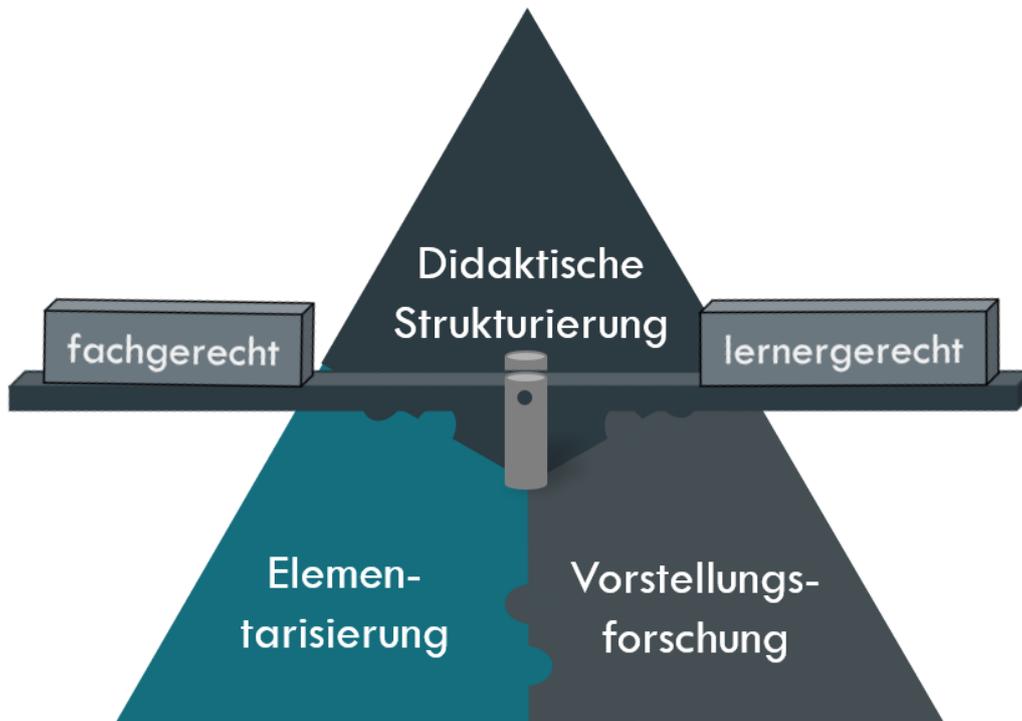


Abb. 4. Model of Educational Reconstruction (Duit et al., 2012) als drei ineinandergreifende Teilbereiche.

Außerdem besteht im Projekt die besondere Situation, dass die aufbereiteten Inhalte in einer Ausstellung mit Exponaten für Laien zugänglich gemacht werden sollen. Deshalb müssen konzeptionelle Überlegungen dazu angestellt werden, welche Interaktionsschritte zwischen Exponat und Laie denkbar sind und angestrebt werden. Dieser Arbeitsschwerpunkt im Projekt ist auf der ESERA-Tagung (European Science Education Research Association) in Bologna 2019 und auf verschiedenen GDPC-Tagungen (Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik) vorgestellt und diskutiert worden. Beiträge in den jeweiligen Tagungsbänden wurden veröffentlicht (s. Kap. 4.1.3).

2.2.1 Fachliche Klärung

Im Rahmen der Elementarisierung (Bleichroth, 1991) wurde mittels Dokumentenanalyse von Fachliteratur aus der Geografie (z. B. Grotzinger & Jordan, 2017) herausgearbeitet, dass es sich beim phänomenologischen Ausdruck der Dynamik an der Küste im Wesentlichen um Strömungs- und Strukturbildungsphänomene handelt. Daraufhin wurde Fachliteratur aus den Bereichen Strömungsmechanik (z. B. Wilde, 1978), Thermodynamik (z. B. Blundell & Blundell, 2010), Nichtgleichgewichtsthermodynamik (z. B. Demirel, 2014) sowie der Theorie komplexe Systeme (Bar-Yam, 1997; Schurz, 2006) vertieft analysiert. Zu dieser Analyse sind ferner Artikel aus wissenschaftlichen Journals zu verschiedensten Strukturbildungen hinzugestoßen, bspw. zu Rippeln (Nordmeier, 2006; Anderson, 1990) zu Dünen (Herrmann 2005; Dittes 2012) zu Wirbelstürmen (Luo, Zhou & Gao 2006; Ooyama 1982) zu Wasserwellen (Smyth & Moum 2012; Hargreaves 2003) zu Konvektionszellen (De Angelis, Post & Travis 1986; Roedel & Wagner 2011), zu Wirbelstraßen (Ikeda & Apel 1981), zu Prielen (Fagherazzi 2008; Jones & Schumm 1999) und zu Mäandern (Stølum 1996; Bröking 2006). So wurde eine um Strömungen und Strukturbildungen arrangierte Sachstruktur dargestellt. Zentral sind hier Prinzipien des Ausgleichs (Temperatenausgleich, Konzentrationsausgleich etc.) sowie Prinzipien der positiven und negativen Rückkopplung, welche die Emergenz (Ebeling, Freund & Schweitzer, 1998) und Selbstorganisation von strukturbildenden Systemen begründen.

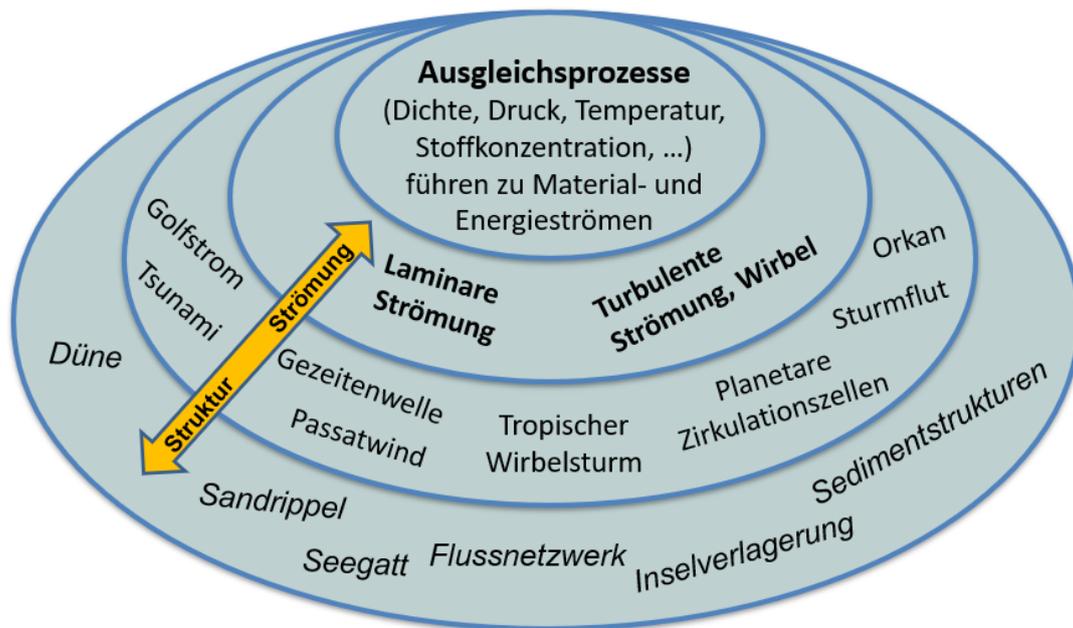


Abb. 5. Übersicht über Strömungs- und Strukturbildungsphänomene als Resultat von Ausgleichsprozessen

Letztlich wurden mit Blick auf Strömungen und Strukturbildungen vier physikalische Grundprinzipien (Elementaria) herausgeschält (Bliesmer, 2020; vgl. Bliesmer & Komorek, 2018, S. 306):

Grundidee I Spezifische Energiequellen und äußere Kräfte treiben die Dynamik an der Küste an

Die Sonneneinstrahlung auf die Erde sowie äußere Kräfte (z. B. die Gravitation des Mondes) treiben die Dynamik an den Küsten vornehmlich an. Die Erde ist demnach kein isoliertes System, in das sich ein thermodynamisches Gleichgewicht und eine Maximierung der Entropie einstellen könnte. In offenen Systemen gibt es ständig Zu- und Abflüsse von Energie und/oder Materie. Im Falle der Erde wirkt die Sonne ein und die Erde strahlt auch wieder in den Weltraum ab. Die Einwirkung der Sonne erfolgt allerdings nicht gleichmäßig überall auf der Erde, sodass u. a. in den Fluiden Luft und Wasser Temperaturunterschiede, Konzentrationsunterschiede und Impulsdichteunterschiede (sog. Gradienten) resultieren.

Grundidee II Gradienten führen zu einer makroskopischen Dynamik von Wasser, Luft und Sand

Treten Gradienten in den Fluiden Luft und Wasser auf, dann setzen sowohl molekulare als auch konvektive Transportprozesse ein, die auf eine Verringerung der sie erzeugenden Gradienten (Ausgleich) gerichtet sind. Dass ein Ausgleich angestrebt wird, ergibt sich rein aus statistischen Überlegungen. Für einen ausgeglichenen Zustand gibt es auf der mikroskopischen Ebene schlicht mehr Möglichkeiten, sodass er sich bei der zufälligen Bewegung auf mikroskopischer Ebene letztendlich einstellt. Um dies zu quantifizieren wurde die Entropie eingeführt. Sie ist ein Maß für die Anzahl der Mikrozustände pro beobachtbarem Makrozustand (Blundell & Blundell, 2010). Gemäß dieser Definition nimmt die Entropie während des Ausgleichsprozesses zu. Die Gradienten führen im Zuge der Ausgleichsbewegung einerseits zu molekularen Transportprozessen. Andererseits sind diese molekularen Transportprozesse bei hohen Gradienten von einer gerichteten Bewegung überlagert (Konvektion). Die Gleichungen zu den Transportprozessen verfügen über eine jeweils ähnliche Struktur, wie man in der folgenden Tabelle erkennen kann (Wilde, 1978).

Tab. 2. Übersicht über molekulare und konvektive Transportprozesse

Wärmetransport	(a) molekular (eine Richtung)	$\frac{\dot{Q}}{A} = \lambda \cdot \frac{dT}{dy}$
	(b) konvektiv (laminar, eine Richtung)	$\frac{\dot{Q}}{A} = c_p \cdot T \cdot \rho \cdot v_x$
Massentransport	(a) molekular (eine Richtung)	$\dot{m} = D \cdot \frac{d\rho}{dy}$ bzw. $\dot{n} = D \cdot \frac{dc}{dy}$
	(b) konvektiv (laminar, eine Richtung)	$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v_x$ bzw. $\dot{n} = c \cdot A \cdot v_x$
Impulstransport	(a) molekular (eine Richtung)	$\tau = \nu \cdot \frac{dl_x}{dy}$
	(b) konvektiv (laminar, eine Richtung)	$\frac{\dot{p}}{A} = \rho \cdot v_x^2$

Die konvektiven Transportprozesse sind auf Makroebene als freie bzw. erzwungene Strömung in Wasser oder Luft zu beobachten. Durch Wechselwirkung überträgt sich diese Dynamik auch auf granulare Materie (z. B. Sand).

Grundidee III Dynamik ist durch Ausgleich und Selbstorganisation charakterisiert

Die durch Ausgleichsprozesse in Form von Strömungen hervorgerufene komplexe Dynamik der granularen Materie an der Küste führt u. a. auf positive und negative Rückkopplungsprozesse. Das Zusammenspiel aus beiderlei lässt sich als Selbstorganisation deuten, durch die Strukturbildung in granularer Materie auftritt. Als Beispiel lässt sich das Phänomen einer Düne heranziehen (Herrmann, 2005): Zwar ist die Bewegung des Sands, der durch eine Strömung bewegt wird, zunächst ungeordnet. Allerdings kann es dazu kommen, dass Sand an einem Hindernis (z. B. Strandhafer) hängen bleibt. Hierdurch stellt der hängengebliebene Sand wiederum selbst ein Hindernis für andere, sich noch bewegende Sandkörner dar. Dadurch steigt an diesem Ort die Wahrscheinlichkeit für die weitere Anlagerung von Sandkörnern mit jedem weiteren Sandkorn, das sich anlagert. Es wird also ein Zustand erreicht, der durch eine Selbstverstärkung charakterisiert ist (positive Rückkopplung) – die Anhäufung wächst. Unendlich groß kann sie jedoch nicht werden, weil sie irgendwann so steil wird, dass weiterer Sand irgendwann von der Anhäufung wieder herunterrutscht. Ist dieser Zustand erreicht, spricht man von einer Selbstbeschränkung des Systems (negative Rückkopplung). Dass eine Düne entsteht, ist also eine Folge von systemischen, durch Strömungen induzierten, positiven und negativen Rückkopplungsprozessen.

Grundidee IV Ausgleich und Selbstorganisation erfolgen komplementär

Ein Ausgleich geht mit einer Entropieerhöhung einher. Strukturbildungen sind gewissermaßen das Gegenteil des Ausgleichs und bedeuten deshalb eine Entropieverringerung. Ausgleich und Selbstorganisation sind jedoch kein Widerspruch, sondern bedingen einander: Für die Strukturbildung einer Düne ist ein Ausgleichsprozess in Form einer Strömung nötig. Daran ist zu erkennen, dass es zur Selbstorganisation (Entropieverringerung) an einem anderen Ort, außerhalb oder innerhalb des betrachteten Systems, einer mindestens kompensierenden Entropieerhöhung (z. B. durch Ausgleichsprozesse) braucht. Ausgleich und Struktur gehen also Hand in Hand.

Im Kontext der fachlichen Klärung wurden die Bachelorarbeiten von Berghegger (2019) und Witte (2019) erfolgreich abgeschlossen, die verschiedene wirbelhafte und globale Strömungs- und Strukturphänomene auf die herausgearbeiteten Elementarprinzipien untersuchten und so ihre Eignung zur

Beschreibung multipler Strömungs- und Strukturphänomene bestätigen konnten. Die fachlichen Analysen und die umfangreich beschriebenen physikalischen Grundideen können bei Bliesmer (2020) eingesehen werden.

2.2.2 Vorstellungsforschung.

Um die herausgearbeiteten Elementarprinzipien im Sinne des Models of Educational Reconstruction noch besser an die Vorstellungen von künftigen Besucherinnen und Besuchern anpassen zu können, wurden empirische Untersuchungen zu ihrem Vorwissen/Präkonzepten (Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982) durchgeführt und abgeschlossen: Was verstehen Besuchende unter Strömungen und Strukturbildungen? Was verbinden sie damit? Wie erklären sie sich Strömungen und Strukturbildungen im Küstenraum? Diese Forschungsfragen galt es zu beantworten, weil die Antworten dabei helfen, die Besuchenden "dort abzuholen", wo sie kognitiv und von ihrem Vorwissen stehen. Dies ist das fachdidaktisch übliche Vorgehen, um Erklärungen zu entwickeln, die nicht an den Adressaten "vorbeigehen". Um die aufgeführten Fragen zu beantworten, wurden zwei Interviewreihen entwickelt, die auf dem problemzentrierten Interview nach Witzel (1985) beruhen. In der ersten Interviewreihe wurden den Befragten Bilder von verschiedensten Strömungen und Strukturbildungen sowie anderweitigen Objekten gezeigt. Sie wurden aufgefordert, die Bilder zunächst nach Strömungen und schließlich nach Strukturbildungen zu gruppieren. Dann folgte eine Phase, in der sie ihre Zuordnungen begründen mussten. Es wurde diskutiert, weshalb manche Bilder zugeordnet werden und manche nicht. Die Diskussionen halfen dabei herauszufinden, welche Charakteristika die Interviewten mit den beiden Phänomenbereichen verbinden. Für die zweite Interviewreihe wurden zwei verschiedene Versuche entwickelt. Ein Versuch illustrierte die Bildung einer Konvektionszelle, die sich aufgrund eines Temperaturunterschieds im Wasser manifestiert (Abb. 6, links). Mit dem zweiten Versuch konnten die Befragten durch Bewegen einer mit Wasser und Sand gefüllten Schale eine Strukturbildung im Sand erzeugen (Abb. 6, rechts).

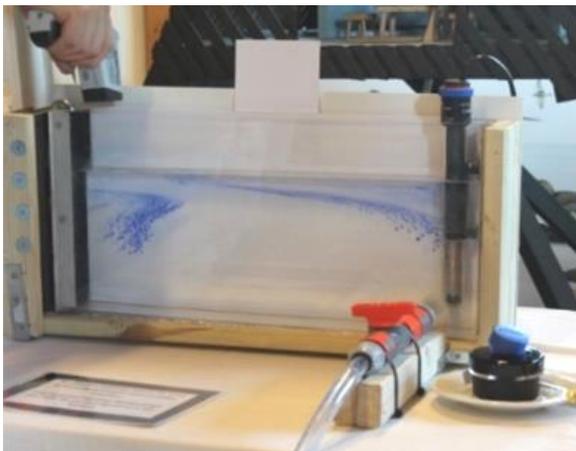


Abb. 6. Versuch zur Erzeugung einer Strömung (rechts) und zur Erzeugung einer Sandstruktur (links)

Während die Teilnehmenden die jeweiligen Versuche manipulierten, wurden sie im Interview befragt, was sie erwarten und was sie beobachteten. Schließlich wurden sie auch aufgefordert zu erklären, wie es zur Ausbildung der Strömung bzw. der Strukturbildung kommt. Dies wird als POE-Methode bezeichnet (Liew & Treagust, 1995; White & Gunstone, 1992). Die beiden entwickelten Interviews wurden jeweils elfmal mit 16 interessierten Laien durchgeführt. Hierunter waren nicht nur Schülerinnen und Schüler. Auch Erwachsene sowie Seniorinnen und Senioren wurden interviewt, da die Ausstellungen der Nationalparkhäuser für Personen jeglichen Alters zugänglich sind. In diesem

Kontext wurden die Bachelorarbeiten von Ruhland (2019), Wilken (2019) und Schoemaker (2019) erfolgreich abgeschlossen. Die Abb. 7 zeigt die Struktur der Studie als Übersicht:

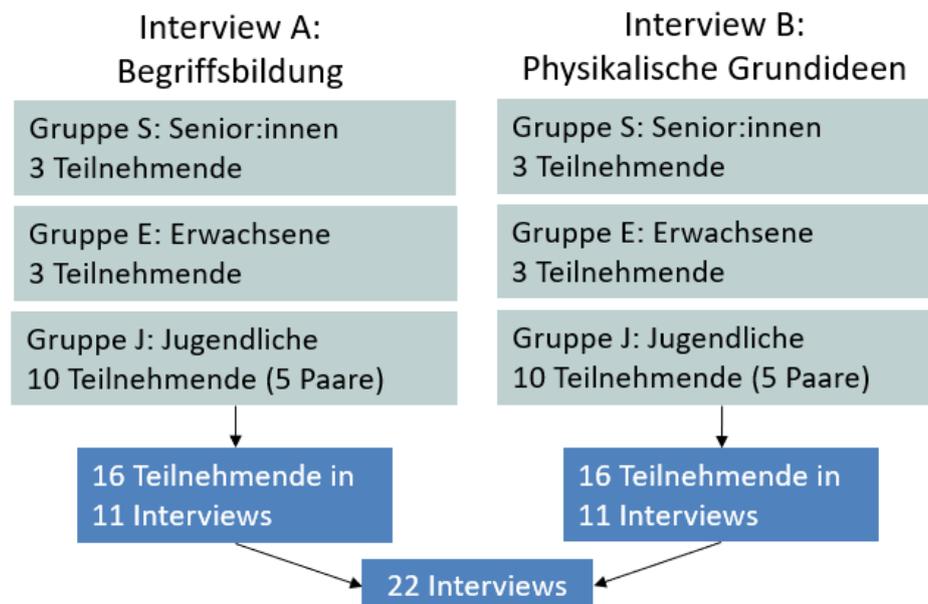


Abb. 7. Übersicht zur Studie: Vorstellungsforschung im Bereich Strömungen und Strukturbildungen

Die Interviews boten wertvolle Einsichten in die Denk- und Erfahrungswelt der Befragten. Denn diese verbinden mit Strömungen und Strukturbildungen Charakteristika, die teilweise über die fachwissenschaftliche Sicht hinausgehen oder unangemessen sind. Insbesondere Strömungen assoziieren viele Proband:innen mit Gefahr für Leib und Leben. Räumlich wenig ausgedehnte und schwache Strömungen nehmen sie überraschenderweise nicht mehr als Strömungen wahr. Darüber hinaus versuchen sie Strömungen oftmals mit einem Prinzip zu erklären, das man als "Bewegungsübertragung" bezeichnen könnte: In vielen ihrer Erklärungen beginnen sie ihre Argumentation stets damit, dass sich bereits etwas in Bewegung befinden müsse, das schließlich seine Bewegung auf Wasser überträgt, sodass durch diese "Bewegungsübertragung" eine Strömung hervorgerufen wird.

Bei Strukturbildungen fällt ihnen die Versprachlichung von deren Eigenschaften schwer, weil es in der Alltagssprache kein präzises Wording gibt, um die besonderen Charakteristika von Strukturbildungen sprachlich fassen zu können. Sie versuchen Strukturbildungen häufig mit den Merkmalen Regelmäßigkeit bzw. Unregelmäßigkeit zu beschreiben, verstricken sich dabei jedoch bei intensiven Nachfragen häufig in Widersprüche und bleiben letztlich ratlos zurück. Bei ihren Ansätzen, das Auftreten von Strukturbildungen im Sand (z. B. Rippel, Dünen, Priele etc.) zu erklären, greifen sie auf die Vorstellung zurück, dass jene Strukturbildungen Abdrücke seien. Es müsse also bereits etwas Strukturiertes vorhanden sein (z. B. eine Wasserwelle), das seine Struktur auf den Sand überträgt. Um ihrer Argumentation Nachdruck zu verleihen, ziehen sie mit Reifenspuren oder Schuhabdrücken Beispiele aus dem Alltag heran. Dort sei es genauso. Die Erklärungen, die von den Befragten vorgebracht werden, sind bisweilen inkonsistent und fokussieren nicht auf die interessierenden Wirkmechanismen (Rückkopplungen). Es ist für die Befragten daher insbesondere schwierig nachzuvollziehen, dass sich Strukturbildungen im Sand aus sich selbst heraus organisieren. Auf Basis der Interviews wurden schlussendlich neue Ansätze und Ideen für die didaktische Strukturierung von Lernangeboten erarbeitet, die

allein auf der Grundlage einer Analyse der fachlichen Sicht nicht auszudenken gewesen wären. Diese Ansätze und Ideen sind im nachfolgenden Kapitel übersichtsartig dargestellt.

2.2.3 Fachdidaktische Leitlinien.

Um die Ergebnisse der fachlichen Klärung und der Vorstellungsforschung aufeinander zu beziehen, wurden beide gemäß dem *Model of Educational Reconstruction* miteinander verglichen. So konnten Abweichungen zwischen den Vorstellungen von Laien und den fachlichen Beschreibungen zu Strömungen und Strukturbildungen, aber auch Übereinstimmungen identifiziert werden. Diese Identifikation ist wichtig, weil es in der Fachdidaktik konkrete Strategien gibt, wie mit solchen Abweichungen bzw. Übereinstimmungen zu verfahren ist (Duit, 2007). So lassen sich identifizierte Übereinstimmungen dazu nutzen, kontinuierliche Lernwege zu gestalten. Hier wird an die Vorstellungen der Lernenden angeknüpft, um sie nahtlos zu einer fachlichen Beschreibung von Strömungen und Strukturbildungen zu führen (Strategie: Anknüpfung). Wurden Abweichungen zwischen der fachlichen Sicht und den Vorstellungen der Laien identifiziert, dann werden diese nicht etwa als störende Lernhemmnisse interpretiert, sondern als Chance für das Lernen – für einen sog. *Conceptual Change* (Schecker, Wilhelm, Hopf & Duit, 2018; Labudde, 2010). Hierbei werden die Laien in einem Lernangebot mit Situationen konfrontiert, in denen sie mit ihren fachlich unangemessenen Vorstellungen an Grenzen stoßen, sodass sie beispielsweise einen Widerspruch verspüren (Strategie: Konfrontation). Dies erzeugt eine Unzufriedenheit mit ihren bisherigen Vorstellungen, sodass bei den Lernenden das Bedürfnis nach weiterführender Klärung geschaffen wird. Dieses Bedürfnis bietet sodann einen exzellenten Nährboden für eine Lernsituation, in der fachliches Wissen angeboten wird, um Klärung herbeizuführen und Widersprüche aufzulösen. So wird ein diskontinuierlicher Lernweg realisiert.

Der Vergleich zwischen Elementarisierung und den hier vorliegenden Forschungsergebnissen zu den Laienvorstellungsforschung hat insgesamt 37 konkrete Möglichkeiten (didaktische Leitlinien) aufgezeigt, wie an die Vorstellungen von Laien angeknüpft werden kann bzw. wie die Befragten mit fachlichen Vorstellungen konfrontiert werden können. Die Ausgestaltung der didaktischen Leitlinien erfolgte in einer Dissertation, die von Bliesmer (2020) mit Auszeichnung abgeschlossen wurde. Die Dissertation liegt als Open Access vor: <https://www.logos-verlag.de/ebooks/OA/978-3-8325-5190-2.pdf>. Dort können alle 37 Leitlinien eingesehen werden. Um das Verfahren jedoch beispielhaft zu verdeutlichen, sind im Folgenden vier zentrale Leitlinien aufgeführt:

Leitlinie I Anknüpfung an die Gefährlichkeit von Strömungen

Da die Befragten Strömungen mit Gefährlichkeit, hoher Menge und hoher Geschwindigkeit assoziieren, lässt sich hieran anzuknüpfen. Zunächst sind also derartige Strömungen zu thematisieren. Dann gilt es jedoch zu verdeutlichen, dass es ebenfalls Strömungen gibt, die räumlich wenig ausgedehnt sind und nur langsam fortschreiten. Indem Strömungen unter dem Blickwinkel von Gefährlichkeit betrachtet werden, lässt sich sodann an weiteres fachliches Merkmal anknüpfen: Die Gefährlichkeit von Strömungen resultiert aus der Kollektivität und Gerichtetheit der Bewegung. In Prielien können Strömungen daher besonders stark werden und Menschen gefährden.

Leitlinie II Konfrontation mit dem Problem, Strukturen als (un-)regelmäßig zu charakterisieren

Sprechen Laien über Strukturbildungen, dann werden sie sowohl als regelmäßig als auch als unregelmäßig charakterisiert. Was zunächst widersprüchlich klingt, hat vermutlich den Hintergrund, dass sich die hier in diesem Projekt betrachteten Strukturbildungen hinsichtlich ihres Ordnungsgrades in einem Spektrum zwischen perfekten Strukturen (z. B. ein Mosaik) und Chaos befinden. Je nachdem,

ob die Strukturen im Sand mit einer perfekten Struktur oder mit Chaos verglichen werden, kommt man dann zu den beiden unterschiedlichen Einschätzungen, sie entweder als regelmäßig oder unregelmäßig einzustufen. Das unterstreicht die Ungeeignetheit der beiden Begriffe, um Strukturbildungen charakterisieren zu können. Mit dieser Problematik gilt es Lernende zu konfrontieren und ihnen dann ein aus fachlicher Sicht angemessenes Merkmal für Strukturbildungen anzubieten: die "Ähnlichkeit". Dieser Begriff ist semantisch weicher und kann daher gut die Stellung von Sandstrukturen im Spektrum zwischen perfekten Strukturen und Chaos ausdrücken. Außerdem ist hierdurch direkt eine Verbindung zur Vorstellung von Laien hergestellt worden, dass Strukturen einmalig sind und deshalb nur in *ähnlicher* Form, nicht jedoch exakt gleich erneut auftreten können. Strukturen lassen sich also räumlich und zeitlich als ähnlich charakterisieren.

Leitlinie III Anknüpfung an erzwungene Strömungen

Strömungen gibt es in zwei Varianten. Zum einen verursacht durch äußere Kräfte (z. B. durch Gefälle oder Pumpen). Das sind erzwungene Strömungen. Zum anderen gibt es Strömungen, die durch Temperatur- oder Konzentrationsunterschiede hervorgerufen werden. Diese bezeichnet man als freie Strömungen. Dass Laien Strömungen häufig mit einer Vorstellung von "Bewegungsübertragung" zu erklären versuchen, passt eher zur Variante der erzwungenen Strömungen, denn diese Vorstellung hat fachlich eine Nähe zu auftretenden Geschwindigkeitsunterschieden in Fluiden. In einem Lernangebot böte es sich daher an, an die Vorstellung von Bewegungsübertragung anzuknüpfen und es als Prinzip der Übertragung von Bewegungsenergie zu interpretieren. Dies wiederum motiviert Fragestellungen nach den Energiequellen für Strömungen, führt also direkt auf die fachlichen Inhalte. Erst im Anschluss ist dann die zweite Variante von Strömungen zu thematisieren (freie Strömungen), die durch Temperatur- bzw. Konzentrationsunterschiede ausgelöst werden.

Leitlinie IV Konfrontation mit dem Henne-Ei-Problem bei Strukturbildungen

Befragte versuchen Strukturbildungen damit zu erklären, dass sie Abdrücke äußerer Einflüsse seien. Sie nennen diesbezüglich Beispiele wie Reifenspuren oder Schuhabdrücke im Sand. Daraus folgern sie, dass beispielsweise Rippelmuster auch eine Art Abdruck, z. B. von Wasserwellen, sein müssen. Da dies fachlich nicht korrekt ist, können sie wie folgt mit der Problematik ihrer Erklärung konfrontiert werden: Hierzu bietet sich ein Henne-Ei-Problem an. Wären die Rippelmuster ein Abdruck der Wasserwellen, würde man automatisch anerkennen, dass die Wasserwellen über eine Struktur verfügen, die sich auf den Sand überträgt. Dann jedoch bestünde das Problem, erklären zu müssen, wie die Wasserwellen selbst zu ihrer Struktur kommen. Denn anders als Reifen oder Schuhsohlen, sind Wasserwellen nicht bewusst vom Menschen konstruiert und mit einer Struktur versehen wurden. Das zeigt, dass die Argumentation über Abdrücke die Klärung nicht voranbringt, sondern nur verlagert. Denn irgendwo muss eine erstmalige selbstorganisierte Strukturbildung stattgefunden haben. Hier lassen sich die fachlich relevanten Wirkmechanismen (positive und negative Rückkopplungen) anbieten, um den Lernenden einen Ausweg aus dem Henne-Ei-Problem zu weisen. Denn mithilfe von Rückkopplungen lässt sich die Selbstorganisation von Strukturbildungen entschlüsseln.

2.2.4 Präsentation auf einem Fachtag.

Um bis hierhin generierte Forschungsergebnisse in die Realität der Bildungseinrichtungen einfließen zu lassen, wurde für alle Leitenden und Mitarbeitenden von Nationalparkhäusern im Wattenmeer sowie weiterer Bildungseinrichtungen an der Küste ein Fachtag veranstaltet (Einladung, Programm und Liste der teilnehmenden Einrichtungen: s.u.). Im Zentrum dieses Fachtags standen Lernmaterialien und fachdidaktische Forschungsergebnisse zu Strömungs- und Strukturbildungsphänomenen.

Zunächst wurde allen Teilnehmenden in einem Vortrag und in einer anschließenden Diskussion verdeutlicht, dass die physikalische Perspektive auf den Küstenraum genauso entscheidend ist wie die biologische, um die Komplexität der dortigen Dynamik besser verstehbar machen zu können. Daraufhin wurden die im Rahmen des Projekts herausgearbeiteten Elementarprinzipien vorgestellt, die die Physik im Küstenraum kennzeichnen. Hier wurde insbesondere auf ein Ausgleichsprinzip und auf Rückkopplungsprinzipien verwiesen. Die Dynamik in Form von Strömungen wird im Wesentlichen durch Unterschiede hervorgerufen: Temperaturunterschiede führen beispielsweise zu Wind, aus Temperatur- und Konzentrationsunterschieden resultieren globale thermohaline Meeresströmungen, deren bekanntester Teil der Golfstrom ist. In allen Fällen bewirken die auftretenden Luft- bzw. Wasserströmungen, dass die sie hervorrufenden Unterschiede wieder abgebaut werden. Strömungen sind also als phänomenologischer Ausdruck eines Ausgleichsbestrebens zu interpretieren. Umgekehrt stellen sich Strukturen wie beispielsweise Rippel, Dünen oder sogar ganze Inseln durch ein Wechselspiel von positiven Rückkopplungen (Selbstverstärkungsmechanismen) und negativen Rückkopplungen (Selbstbeschränkungsmechanismen) ein.

Neben der Darstellung der Resultate fachlicher Analysen wurden auch die fachdidaktischen Verfahren vorgestellt, wie die Elementarprinzipien aus der Literatur herausgearbeitet werden. In Anknüpfung an die fachlichen Darlegungen wurden am Fachtag zudem verschiedene Exponate vorgestellt, die im Rahmen des Projekts entwickelt und beforscht wurden (Kapitel 2.4) und die verschiedene Strömungs- und Strukturbildungsphänomene zu entschlüsseln erlauben. Am Fachtag wurden darüber hinaus kleinere Workshops durchgeführt, die auf weitere Bedarfe hinsichtlich Themen, Bildungsformaten und weiteren Fachtagen hindeuteten. Zu diesen Bedarfen zählten beispielsweise Themen wie Orientierung von Zugvögeln (Animal Navigation), eine physikalische Wattwanderung, ein Fachtag zum Thema Ebbe und Flut und ein Realmodell, das die Bewegung des Erde-Mond- Systems erfahrbar macht. Der erste Fachtag hat somit zu weiteren fruchtbaren Aufgabenfeldern im Projekt geführt.

Am Fachtag nahmen 34 Personen aus 21 Bildungseinrichtungen teil:

- Seehundsstation NPH Norden-Norddeich
- Nationalparkverwaltung
- NPH Bensersiel
- Multimar Wattforum
- grün&bunt - natur erleben
- NPH Wangerland
- NPH Dornumersiel
- NPH Carolinensiel
- NPH Greetsiel
- Zentrum Natur und Technik Aurich
- NPH Wittbülten, Spiekeroog
- Küstenmuseum Wilhelmshaven
- NPH Juist
- ZNL (Zertifizierte Natur- und Landschaftsführerin)
- Zinzendorfschule Tossens
- Nationalpark-Erlebnisstation Sehestedt
- Wattenmeer-Besucherzentrum WHV
- ICBM
- Universität Flensburg
- Graf-Anton-Günther-Schule Oldenburg
- Universität Oldenburg

Fachtag

für Nationalparkhäuser und weitere Bildungseinrichtungen an der Küste

Exponate und Ausstellungskonzepte zur Physik der Küste, des Wattenmeeres und des Ozeans

Dienstag, 12. Februar 2019
Universität Oldenburg, Campus Wechloy,
Raum W2 1-143, 10-16 Uhr

- Programm**
- 9:30 offene Kaffeerunde
 - 10:00 **Begrüßung und Berichte: Wie können wir physikalische Exponate in Ausstellungen integrieren und warum eigentlich?**
 - 11:00 **Vorstellen einer praktischen Broschüre mit Anleitungen, Beispielen, Hilfe zur Selbsthilfe**
Erfahrungsberichte aus den Nationalparkhäusern
 - 12:30 gemeinsames Mittagessen
 - 13:30 **Drei Workshops zu Themen der Broschüre**
 - 15:00 **Impulsvortrag, Diskussion und Resümee**

Abb. 8. Einladung zum Fachtag "Physik der Küste, des Wattenmeeres und des Ozeans"

2.2.5 Anwendung der Leitlinien: Konzeption einer physikalischen Wattwanderung.

Die Bildungsangebote der außerschulischen Lernorte im Raum des Wattenmeeres umfassen neben Ausstellungen und Lernstationen in den Häusern selbst auch direkte Erkundungen des Wattenmeeres, um den Besucherinnen und Besuchern Primärerfahrungen bieten zu können. Insbesondere Wattwanderungen erfreuen sich bei Touristen beinahe das ganze Jahr über großer Beliebtheit. Solche Wanderungen verfügen über ein sehr großes Potenzial, nicht nur für das Lernen von Biologie, sondern auch für das Lernen der oben beschriebenen und fachdidaktisch aufbereiteten physikalischen Inhalte, repräsentiert durch Strömungs- und Strukturbildungsphänomene an der Küste. Aus diesem Grund ist im Rahmen des Projekts ein Konzept für eine physikalisch orientierte Wattwanderung ent-

wickelt und erprobt worden. Eingebunden in diese Entwicklung und Erprobung wurden zwei Studierende, die hier ihre Bachelorarbeiten anfertigten (Optazi, 2019; Rosenau, 2019). Die Idee zur Entwicklung der Wattwanderung, wurde mit verschiedenen Leitenden der Nationalparkhäuser beim Fachtag zur Physik der Küste (s. Kap. 2.2.4) diskutiert. Durch die Diskussion ist deutlich geworden, dass die Leitenden sich keine reine physikalische Wattwanderung wünschen, sondern daran interessiert sind, physikalische Inhalte in ihre bisherigen Wattwanderungen zu integrieren. Diesem Wunsch sind die Projektverantwortlichen wie folgt nachgekommen: Zunächst wurde eine konventionelle Wattwanderung protokolliert und analysiert. Dabei war interessant, welchen Weg die Wanderung nimmt. Die Studierenden Optazi und Rosenau betrachteten diesen Weg dann unter einer "physikalischen Brille", um anhand von räumlichen und thematischen Gesichtspunkten Anknüpfungspunkte für die Integration von physikalischen Phänomenen, Erklärungen und Modellen herauszuarbeiten.

In Zusammenarbeit mit Optazi (2019) wurde ein Verlaufsplan für eine um physikalische Inhalte erweiterte Wattwanderung entwickelt, die durch Erklärungen und auch kleinere Hands-on-Experimente ergänzt wurde. In physikalischer Hinsicht werden bei der Wattwanderung nunmehr Strömungsphänomene (z. B. Brandungsrückstrom, Gezeiten) und Strukturbildungsphänomene (z. B. Rippel, Dünnen, Inseln) im Küstenraum thematisiert. Strömungen werden den Lernenden hierbei als Ausgleichsprozesse – von Temperatur, Konzentration etc. – nahegebracht. Bei Strukturbildungen wird auf das Prinzip der Selbstorganisation durch negative bzw. positive Rückkopplungen fokussiert, was zu Zuständen führt, die sich durch einen optimierten Materie- bzw. Energietransport auszeichnen. Die Neuentwicklungen wurden dem Leitenden eines Nationalparkhauses vorgestellt und es wurde eine Erprobung der konzipierten Wattwanderung beschlossen.

In Zusammenarbeit mit Rosenau (2019) wurden einige Personen zur Wattwanderung eingeladen und darum gebeten, an zwei Interviews teilzunehmen. Das erste Interview fand vor der Wattwanderung statt. Hier wurden die Teilnehmenden zu ihren Erwartungen und ihren Vorstellungen von physikalischen Inhalten im Küstenraum befragt. Im zweiten Interview nach der Wattwanderung wurde untersucht, inwieweit die Befragten in der Lage sind, die thematisierten Strömungs- und Strukturbildungsphänomene zu beschreiben und zu erklären. Es wurde ermittelt, dass die Teilnehmenden vor der Wattwanderung über nur wenige konkrete Vorstellungen von möglichen physikalischen Inhalten im Wattenmeer verfügen. Strömungsphänomene wurden nur teilweise benannt, Strukturbildungen überhaupt nicht. Im Nachinterview zeigte sich, dass die Befragten insbesondere die Interpretation von Strömungen als Ausgleichsprozesse heranzogen. Sie setzten sie im Interview eigenständig zur Entschlüsselung von Strömungsphänomenen ein. Bei Strukturbildungen wurde allerdings statt auf Selbstorganisation stark auf eine Erklärung fokussiert, die Strukturbildung als Resultat von optimierten Materie- bzw. Energietransporte ansieht. Hier kam es vor, dass solche Optimierungen fälschlicherweise als Ursache für Strukturbildungen genannt wurden. Die Natur strukturiert sich, so die Befragten, damit ein optimierter Zustand erreicht werde. Als Beispiel nannten die Befragten Blutgefäße und die fraktale Struktur von Blitzen bei einem Gewitter. In Wirklichkeit ist es jedoch umgekehrt: Die Optimierung von Materie- und Energietransport ist Resultat von selbstorganisierten Strukturbildungen. Dass genau an dieser Stelle von den Teilnehmenden Ursache und Wirkung verwechselt und damit der Natur animistische Tendenzen unterstellt werden, kommen auch bei Schüler:innen häufig vor. Das zeigt, dass die Wattwanderung an einigen Stellen noch weiterentwickelt werden muss, damit solche fachlich nicht haltbaren Vorstellungen während der Wanderung konfrontiert werden können. Auf Basis dieser Ergebnisse aus dem Vergleich beider Interviews wurden Anpassungen am Verlaufsplan der Wattwanderung und detaillierte Ergänzungsvorschläge für eine zukünftige Durchfüh-

rung dieses Bildungsangebots unterbreitet. Es besteht hier das Ziel, Wattführungen von ihrem kognitiven Gehalt seitens der Dynamik im Watt aufzuwerten, indem die physikalische Perspektive hinzukommt. Das entwickelte Format ist zugleich ein Mittel der Differenzierung nach den Interessen der Besucher:innen im Watt.

2.3 Schwerpunkt C: Fachdidaktische Aufbereitung: Gezeiten

Die fruchtbaren Diskussionen auf dem ersten Fachtag machten deutlich, dass die pädagogisch Verantwortlichen an außerschulischen Lernorten an der Küste einen Bedarf nach Unterstützung verspüren, um das Phänomen der Gezeiten sowohl fachgerecht als auch adressatengerecht thematisieren zu können. Aus diesem Grund wurde zur Aufbereitung des Themas nach demselben fachdidaktischen Modell verfahren, mit dem auch Strömungs- und Strukturbildungsphänomene für Ausstellungen aufbereitet wurden: Das *Model of Educational Reconstruction* (Duit et. al., 2012) wurde eingesetzt. Das Modell fordert zunächst eine fachliche Klärung. Danach sind Studien zu den themenbezogenen Vorstellungen von Laien durchzuführen. Schließlich gilt es, Ergebnisse beider Bereiche aufeinander zu beziehen, um fachdidaktische Leitlinien formulieren zu können, wie das Themengebiet sich sowohl fachgerecht als auch adressatengerecht darstellen lässt. Die Ergebnisse der Aufbereitung wurden auf einem weiteren Fachtag der interessierten Fachöffentlichkeit präsentiert.

2.3.1 Fachliche Klärung.

Beim Bestreben, das Phänomen der Gezeiten fachlich zu klären, muss man sich bewusstmachen, dass es sich dabei nicht um ein singuläres Phänomen, sondern um mehrere Teilphänomene handelt. Je nachdem, welches Teilphänomen entschlüsselt werden soll, werden ein anderes physikalisches Rüstzeug und unterschiedliche Betrachtungsebenen benötigt. Beispiele für Teilphänomene sind:

- das regelmäßige Kommen und Gehen des Wassers an der Küste
- das Auftreten zweier Flutberge und Ebbetäler
- die Anziehung zwischen Erde und Mond
- die Stabilität der Bewegung von Erde und Mond um ihren gemeinsamen Schwerpunkt
- die tägliche Verschiebung der Gezeiten um etwa 52 Minuten
- das Auftreten von Spring- und Nipptiden
- ...

Bei der Strukturierung der fachlichen Klärung von Gezeiten hat es sich als gute Methode erwiesen, das Phänomen zunächst lokal zu betrachten und dann stückweise "herauszuzoomen". Nach der lokalen Betrachtung geht man also zu einer globalen über, nimmt dann auch den Mond mit in die Betrachtung auf und abschließend auch die Sonne. So kann man die einzelnen Effekte und Phänomene zerlegen und strukturiert betrachten. Eine solche Strukturierung wird im Folgenden vorgestellt, dabei wurde Literatur von Malcherek (2010) sowie von Titz & Wagner (2007) herangezogen.

1) *Betrachtungsebene Lokal*

Zur lokalen Ebene gehören die Auswirkungen der Gezeiten an der Küste (das Wasser kommt und geht regelmäßig), in den Meeren (Nordsee: Amphidromie) und Ozeanen (komplexe Ebbe und Flut-Bewegungen über den Erdball). Hier geht es vornehmlich darum, wie das fluide Medium Wasser mit den Landmassen wechselwirkt. Durch diese Wechselwirkung resultieren Bewegungen, die komplexer sind als die naive Vorstellung, das Wasser bewege sich gleichmäßig hin und zurück.

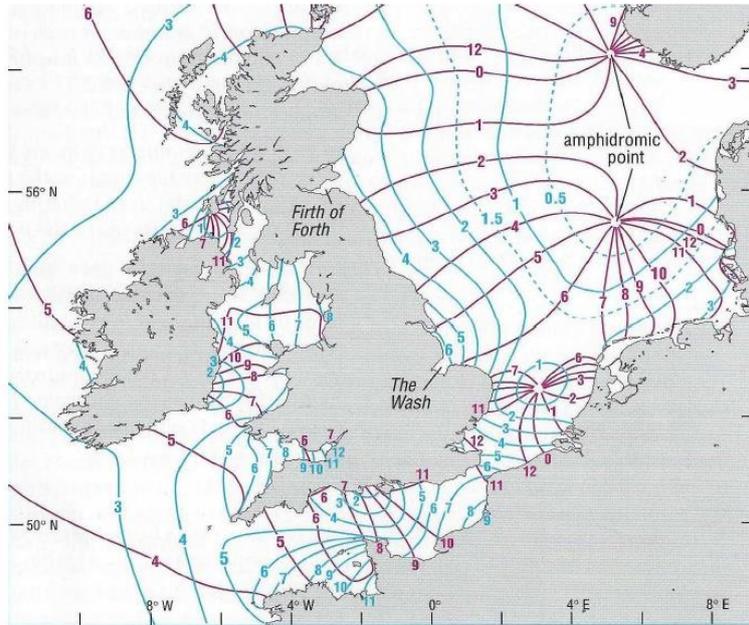


Abb. 9. Wechselwirkung der Gezeitenströmung in der Nordsee; Bildung von Amphidromien (The Open University, 2000)

2) Betrachtungsebene Lunar 1

Diese Ebene beschreibt, wie Flutberge grundsätzlich aufgrund einer differentiellen Gravitation im inhomogenen Gravitationsfeld des Mondes entstehen. Wegen der Abstandsabhängigkeit der Gravitationskraft unterscheidet sich die Gravitationskraft zwischen Erde und Mond an der mondzugewandten und mondabgewandten Erdseite (s. Abb. 10). Wird die Differenz der Gravitationskräfte betrachtet (Bezugssystemwechsel), dann sind zwei von der Erde wegzeigende Kräfte zu erkennen (s. Abb. 11), welche die Entstehung der Flutberge beschreiben. Diese Betrachtungsebene vermeidet, die Drehung von Erde und Mond umeinander zu thematisieren. Erde und Mond sind in hier noch als festgehalten gedacht. So wird die Entstehung der Flutberge auch schon ohne Drehbewegung erklärbar.

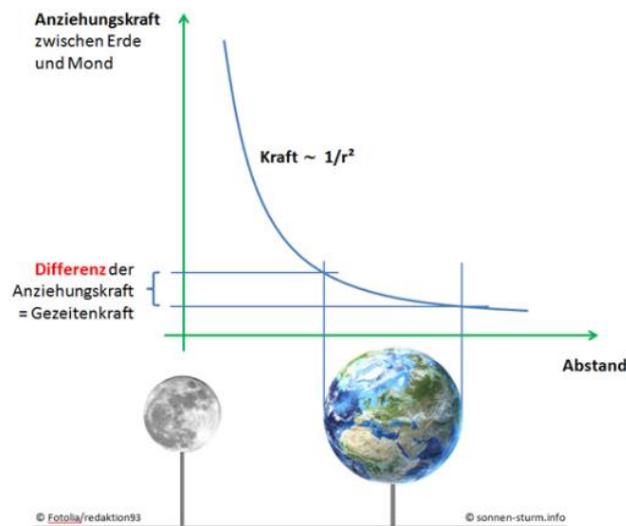


Abb. 10. Verlauf der Gravitationskraft in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Erde und Mond

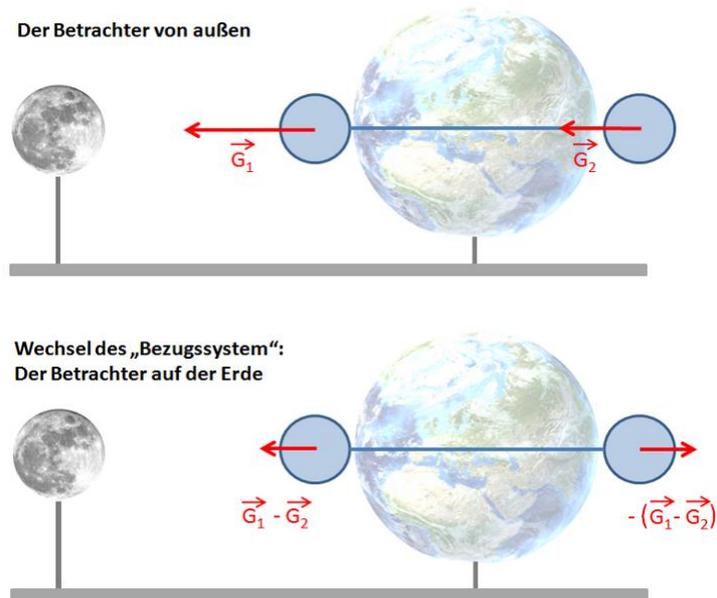


Abb. 11. Richtung der Gravitationskraft in zwei verschiedenen Bezugssystemen

3) Betrachtungsebene Lunar 2

Diese Betrachtungsebene knüpft direkt an die vorigen an und ergänzt die Rotation der Erde, also die Bewegung der Erde um ihre eigene Achse (Abb. 12). Dadurch lässt sich erklären, dass Flutberge und Ebбетäler – und daraus resultierend das Auftreten von Hoch- und Niedrigwasser – sich mit der Zeit im Ort verändern und daher nicht stationär sind.

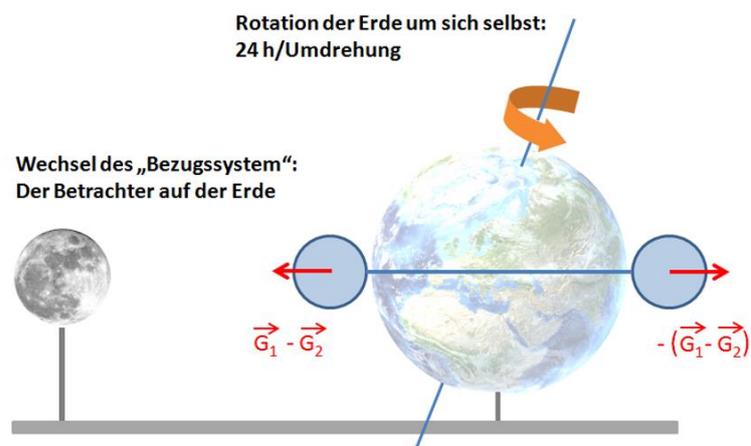


Abb. 12. Bewegung der Erde um eine geneigte Achse alle 24 h (Rotation)

4) Betrachtungsebene Lunar 3

Auf dieser Ebene wird die Erde-Mond-Bewegung betrachtet. Erde und Mond bewegen sich umeinander, also um ihren gemeinsamen Schwerpunkt (Abb. 13). Wegen der im Vergleich zum Mond großen Erdmasse liegt der gemeinsame Schwerpunkt im Inneren der Erde. Dieser gemeinsame Schwerpunkt heißt Baryzentrum. Leider wird in manchen Erklärungen die Bewegung der Erde um den gemeinsamen Schwerpunkt fälschlicherweise weggelassen. Dann sieht es so aus, als bewege sich lediglich der Mond um die Erde. Es ist jedoch wichtig, die Erde-Mond-Bewegung immer als gemeinsame Bewe-

gung um ihren Schwerpunkt zu betrachten. Diese Bewegungsform hat einen besonderen Namen. Sie heißt Revolution.

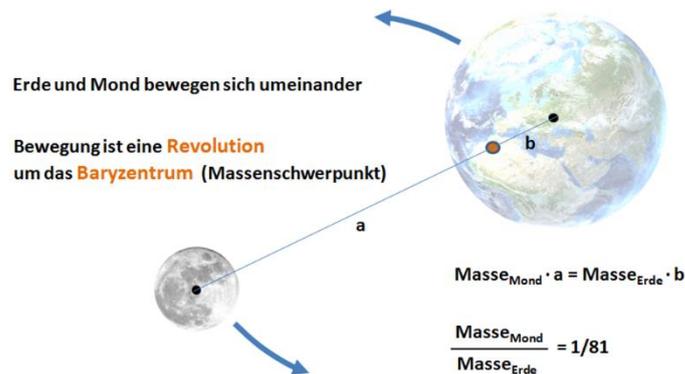


Abb. 13. Bewegung der Erde und des Mondes um ihr Baryzentrum (Revolution)

Bei der Bewegung der Erde um das Baryzentrum resultieren Fliehkräfte. Diese sind überall auf der Erde gleich groß, weil bei der Revolutionsbewegung an jedem Punkt der Erde ein Kreis mit dem gleichen Radius abgeschrieben wird. Diese Fliehkräfte wirken der Gravitationskraft zwischen Erde und Mond entgegen (Abb. 14). Im Baryzentrum sind sie exakt gleich groß. Werden statt der Kräfte Beschleunigungen betrachtet, so lässt sich eine Stabilitätsbedingung formulieren: Es muss eine Gleichheit zwischen Gravitationsbeschleunigung und Zentrifugalbeschleunigung herrschen. Diese Gleichheit erklärt, weshalb Erde und Mond trotz gegenseitiger Anziehung nicht aufeinander fallen, sondern ein stabiles System bilden.

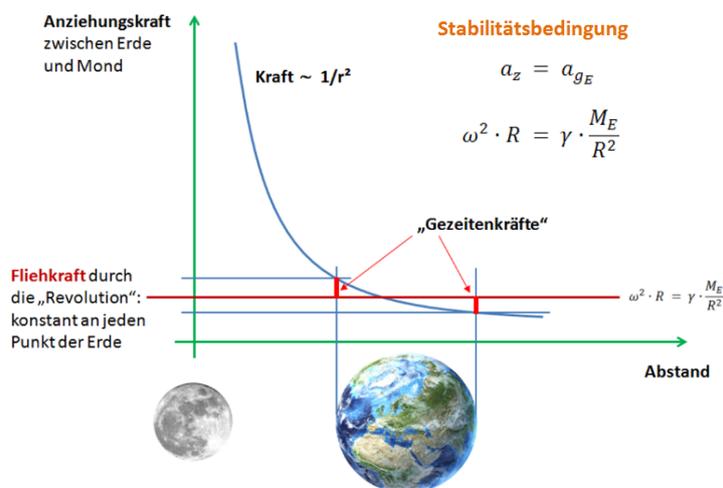


Abb. 14. Gleichheit (Kurvenschnitt) von Fliehkraft und Gravitationskraft im Baryzentrum

5) Betrachtungsebene Solar

Diese Betrachtungsebene ergänzt den Einfluss der Sonne in gleicher Weise wie die des Mondes: Auch die Gravitationskraft zwischen Erde und Sonne beeinflusst das Wasser auf der Erde (Abb. 15). Der Einfluss der Sonne ist jedoch kleiner als der Einfluss des Mondes. Zwar ist die Sonne viel massereicher als der Mond, aber die Erde liegt viel näher am Mond als an der Sonne. Anhand der Gleichung zur

Gravitationskraft ist zu erkennen, dass sich der Abstand stärker auf die Gravitationskraft auswirkt als die Masse. Der Abstand ist der dominierende Faktor. Deshalb hat der Mond einen größeren Effekt auf die Gezeiten als die Sonne. Je nachdem wie Sonne und Mond zueinander stehen, überlagern sich ihre Einflüsse auf das Wasser der Erde. Stehen sie in einer Linie (Vollmond, Neumond), addieren sich ihre Einflüsse und es kommt zur Springtide. Stehen sie im 90°-Winkel zueinander (Halbmond), sind die Einflüsse zeitlich um mehrere Stunden versetzt und es kommt zur Nipptide. Dadurch entstehen quasi vier Flutberge in verschiedenen Bereichen der Erde.

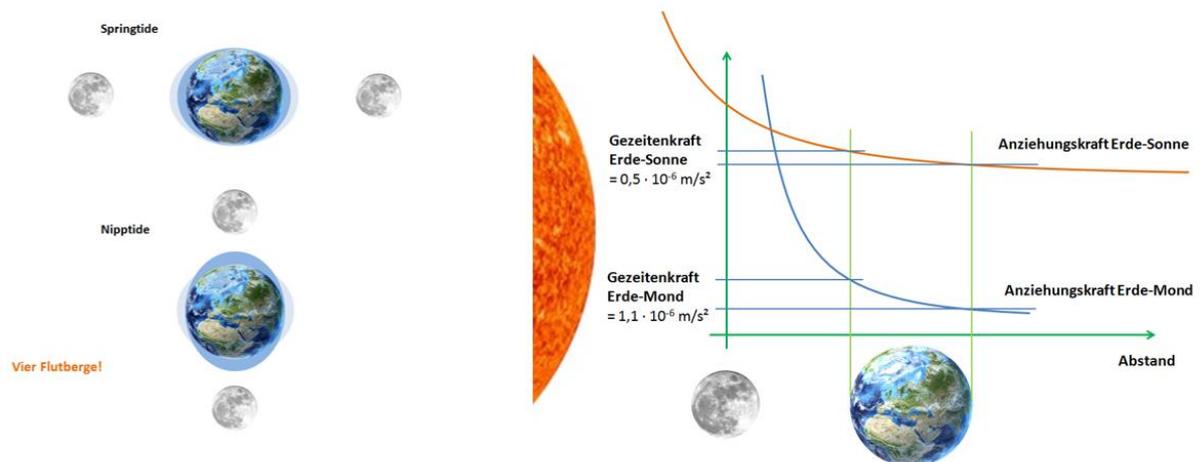


Abb. 15. Entstehung von Spring- und Nipptide anhand der Stellung von Sonne und Mond (Eigene Darstellung)

2.3.2 Vorstellungsforschung.

Genau wie bereits Vorstellungsforschung zu Strömungen und Strukturbildungen, die wertvolle Erkenntnisse über die Denk- und Erfahrungswelt von Laien für die Aufbereitung dieses Themengebiets bot, wurde Vorstellungsforschung rund um das Phänomen der Gezeiten betrieben. Die Forschung wurden unter der Betreuung eines Projektmitarbeiters von Auerbach (2021) geleistet. Hieraus ging eine Masterarbeit hervor. Das Vorhaben gliederte sich in zwei Bereiche. Zunächst stand der Terminus "Gezeiten" selbst im forschersichen Fokus. Denn bevor in einer Lehr-Lern-Situation darüber gesprochen werden kann, wie sich Menschen ein Phänomen oder Sachverhalt erklären, muss sichergestellt werden, dass Lehrende und Lernende über dasselbe sprechen und nicht aneinander vorbeireden. Deshalb wurden problemzentrierte Interviews (Witzel, 1985) geführt, in denen die Proband:innen nach ihren Assoziationen mit dem Terminus "Gezeiten" und ihren Konzepten (Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982) befragt wurden. Im Folgenden sind Teilergebnisse der Befragung aufgeführt.

Die meisten Menschen assoziieren mit Gezeiten den Mond sowie den Wechsel von Ebbe und Flut. Ebbe und Flut sind so eng mit den Gezeiten verknüpft, dass eine Begriffsbildungsforschung (Edelmann & Wittmann, 2012) sich auch auf jene beiden Begriffe zu erstrecken hat. Und tatsächlich gibt es hier begriffliche Unschärfen, weil nicht nur der Prozess des ablaufenden bzw. zulaufenden Wasser mit dem Begriffspaar verbunden wird, sondern auch ein Zustand von niedrigem bzw. hohem Wasserstand. Viele Befragte haben beispielsweise Probleme damit, von Ebbe zu sprechen, wenn der höchste Wasserstand soeben überschritten wurde und das Wasser nun wieder abfließt. Das gleiche gilt für die umgekehrte Situation, in der just der niedrigste Wasserstand durchschritten wurde und dann wieder Flut herrscht, weil das Wasser wieder zuläuft. Viele Proband:innen charakterisieren einen Zustand schlichtweg als Ebbe, wenn wenig Wasser da ist und als Flut, wenn viel Wasser zu sehen ist.

Für die meisten ist es dabei unerheblich, ob das Wasser gerade abläuft oder zuläuft. Auffallend ist zudem, dass der Begriff der Gezeiten bisweilen ebenfalls für Verwirrung sorgen kann: So kommt von einigen Befragten die Äußerung, dass die Gezeiten die Ursache von Ebbe und Flut seien. Was sie genau damit meinen, können sie nicht artikulieren. Offenbar ist für viele Menschen der Gezeitenbegriff nicht nur ein Begriff, der das Phänomen beschreibt, dass die Wasserstände an der Küste variieren, sondern er umfasst zugleich die (teils unbewussten) Ursachen für die Wasserstandswechsel. Würde man mit den Befragten die Ursachen von Gezeiten thematisieren, wäre es also durchaus möglich, dass dies Verwirrungen hervorrufen könnte. Hier ist also Sprachsensibilität an den Tag zu legen. Wenig überraschend ist die Erkenntnis, dass die Gezeiten mit Wasser verbunden werden. Wo kein Wasser ist, da seien aus Befragtensicht auch keine Gezeiten. Ihnen ist nicht bewusst, dass Ebbe und Flut phänomenologischer Ausdruck wirkender Gezeitenkräfte sind und es durchaus auf anderen Planeten Gezeitenkräfte gibt, die dort aber – wegen fehlenden Wassers – andere Phänomene (z. B. hohe vulkanische Aktivität) auslösen können (Peale, Cassen & Reynolds, 1979; Ojakangas & Stevenson, 1986). Außerdem wird das Vorhandensein von Gezeiten sehr stark an den Tidenhub geknüpft. Wo der Tidenhub nicht groß oder nicht vorhanden ist, seien auch keine Gezeiten. Dies ist insofern überraschend, als es in der Nordsee aufgrund der umlaufenden Gezeitenwellen Amphidromien (The Open University, 2000) gibt, die sich dadurch auszeichnen, dass dort kein Tidenhub herrscht. Trotzdem würde man hier das Vorhandensein von Gezeiten nicht negieren, denn ohne Gezeiten gäbe es auch keine Amphidromien. Auch hier könnte es also zur Verwirrung kommen, wenn Amphidromien (kein Tidenhub) als Folge von Gezeiten und deren Wechselwirkung mit den Nordseeküsten betrachtet werden. Das könnte für Laien einen Widerspruch bergen. Generell scheinen Gezeiten bei den Befragten ambivalente Gefühle hervorzurufen. Zum einen verbinden sie damit Spaß beim Baden und im Schlick. Zum anderen fürchten sie jedoch damit einhergehende gefährliche Überschwemmungen und starke Strömungen. Dies passt sehr gut zu der bereits durchgeführten Vorstellungsforschung zu Strömungen. Denn dort assoziieren die Befragten Strömung ebenfalls mit Gefahr für Leib und Leben (s. Kap. 2.2.2).

Mit Blick auf die Erklärungen rund um Gezeiten wird nicht immer die gravitative Anziehungskraft zwischen Erde und Mond für die Entstehung von Ebbe und Flut verantwortlich gemacht. Bisweilen spekulieren die Befragten auch über eine magnetische Wirkung des Mondes. Diese sei für eine Anziehung des Wassers verantwortlich. Sie unterstreichen dies, indem sie einen ihnen bekannten Schulversuch nennen: Wasser, das geradlinig aus einem Hahn strömt, lässt sich mit einem geladenen Stab ablenken, der in die Nähe des Wassers gebracht wird. Wasser sei bipolar und lasse sich demnach auch durch eine angenommene magnetische Wirkung des Mondes beeinflussen. Weitere Erklärungen der Befragten bleiben jedoch diffus und entfernen sich von naturwissenschaftlichen Argumentationen. So erklären sie, dass der Vollmond eine besondere Wirkung auf den Menschen und die Umwelt habe. Der Vollmond Sorge dafür, dass Menschen schlafwandeln und das Wasser unruhig werde. Teilweise geben sie sich mit diesem Erklärungslevel zufrieden. Personen mit weitergehenden Vorstellungen lassen sich in drei Gruppen unterteilen. In die erste Gruppe fallen Erklärungen von Personen, die grundsätzlich nur einen Flutberg im Blick haben. Sie entwickeln Ansätze, die den Wechsel von Ebbe und Flut auf Basis nur eines Flutbergs zu erklären versuchen. In die zweite Gruppe fügen sich Erklärungen, die auf der Annahme zweier Flutberge basieren, um den Wechsel von Ebbe und Flut zu entschlüsseln. Die dritte Gruppe umfasst Ansätze, die sich auf die Tidedauer beziehen.

1) Vorstellungen von Ebbe und Flut, die auf der Existenz eines Flutberg beruhen

Wird nur ein Flutberg angenommen, dann wird sehr häufig mit der Anziehungskraft des Mondes argumentiert (sowohl gravitativ als auch magnetisch). Die Anziehung führe auf der mondzugewandten Seite zu einem Flutberg. Dort sei dann Flut. Daraus folgern die Befragten, dass auf der mondabgewandten Seite Ebbe herrschen müsse. Besonders interessant ist in diesem Zusammenhang die zugehörige Vorstellung, der Mond nähme bei seiner Bewegung um die Erde das Wasser mit. Hiermit versuchen die Probanden den Wechsel von Ebbe und Flut zu erklären: Kommt das vom Mond transportierte Wasser an den Landmassen an, ist der Mond nicht in der Lage, das Wasser über die Landmassen zu ziehen. Deshalb reiße die Verbindung zwischen Mond und Wasser ab. Das Wasser des Flutbergs fließe zurück. Der Flutberg zerfließt. Dies führe zu einer Verringerung des Wasserstandes. Auch dies ist aus Befragtensicht also eine Möglichkeit, die Entstehung von Ebbe nach einer Flut zu entschlüsseln. Teilweise gibt es Personen, denen bekannt ist, dass auch die Sonne einen Einfluss auf die Gezeiten und die korrespondierende Entstehung von Flutbergen hat. Aus ihrer Sicht resultiere bei Neumond ein sehr großer Flutberg. Bei Halbmond bilde sich ebenfalls ein Flutberg, aber dieser sei kleiner und breiter, weil Sonne und Mond über Eck stehen. Sehr interessant ist, was aus Befragtensicht bei Vollmond passiert. In diesem Fall wird zweierlei vermutet: Entweder es entstehe ein Flutberg beim Partner (Sonne bzw. Mond), der über die höhere Anziehungskraft verfügt. Oder aber es entstehen zwei Flutberge. Für diese Gruppe von Menschen ist also der Vollmond die einzige Situation, in der sich zwei Flutberge bilden können. In den anderen Fällen gäbe es immer nur einen Flutberg.

2) Vorstellungen von Ebbe und Flut, die auf der Existenz zweier Flutberg beruhen

Die Entstehung des mondzugewandten Flutbergs wird genauso beschrieben wie beim "Ein-Flutberg-Ansatz". Um den mondabgewandten Flutberg zu entschlüsseln, ziehen die Befragten sog. Rotationskräfte heran. Viele Personen können diese Kräfte und deren Wirkung nicht näher zu erläutern. Andere hingegen führen die Erklärung jedoch weiter und setzen an der Bewegung des Erde-Mond-Systems an. Ihnen ist bekannt, dass sich die Erde und der Mond um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen und dieser Schwerpunkt im Inneren der Erde, nicht jedoch im Mittelpunkt der Erde liegt. Aus dieser Asymmetrie folgern die Befragten auch eine Asymmetrie der Rotationskräfte: Diese seien nicht überall an der Erdoberfläche gleich groß. An der mondabgewandten Erdseite seien sie größer. Deshalb entstehe dort ein zweiter Flutberg. Auch in dieser Gruppe gibt es Personen, denen bekannt ist, dass auch die Sonne die Gezeiten beeinflusst. Hier kopieren die Befragten schlichtweg ihre mondbezogenen Erklärungen und argumentieren zum einen über die Anziehungskraft der Sonne und zum anderen, ganz analog, über Rotationskräfte, die es auch im Sonne-Erde-System geben müsse. Bei Voll- und Neumond müsse es daher zu sehr großen Flutbergen kommen. Halbmond führe hingegen zu kleinen Flutbergen. Allerdings können sie sich nicht entscheiden, ob die Sonne oder der Mond den größeren Einfluss auf das Wasser ausübt. Denn zwar sei die Sonne größer, aber der Mond näher dran. Beides – Größe und Nähe der Himmelskörper – habe Einfluss auf das Wasser.

3) Vorstellungen von der Tidedauer

Da der Mond und dessen Bewegung um die Erde für die Entstehung von Ebbe und Flut verantwortlich gemacht wird, nehmen einige Befragte an, dass sich der Mond in 12 Stunden oder 24 Stunden um die Erde bewege. 24 Stunden werden angenommen, wenn nur von einmal Ebbe und einmal Flut pro Tag ausgegangen wird. 12 Stunden werden angenommen, wenn es aus Befragtensicht zweimal pro Tag zu Ebbe und zweimal pro Tag zu Flut kommt. Nur teilweise wird die Tidedauer über die Eigenrotation der Erde erklärt. Grund hierfür scheint die bereits oben genannte Vorstellung zu sein, dass der Mond das Wasser festhalte und mitnehme. Unter der Brille dieser Vorstellung könne die

Eigenrotation der Erde nicht für die Tidedauer verantwortlich sein. Wäre sie es, dann würden die Kontinente täglich von einem Flutberg überrollt und demnach überspült werden. Vielen Personen ist zudem nicht bekannt, dass die Tidedauer nicht exakt 12 Stunden lang ist. Aber auch wenn ihnen bekannt ist, dass die Dauer nicht 12 Stunden beträgt, heißt das noch nicht, dass sie die tägliche Verschiebung von etwa 52 Minuten im Blick haben, aus der sich eine Regelmäßigkeit der Gezeiten folgern ließe. Dass die Dauer nicht exakt 12 Stunden beträgt – und sich der Zeitpunkt von Hoch- und Niedrigwasser deshalb täglich unterscheidet – führt offenbar dazu, dass Menschen die Tiden als unregelmäßig wahrnehmen. Entsprechend folgern die jeweiligen Befragten, dass der Mond sich unregelmäßig um die Erde bewege. Diese Unregelmäßigkeit erkläre die Unregelmäßigkeit der Gezeiten. Hier zeigt sich ein Zusammenhang zur Vorstellungsforschung rund um Strukturbildungen. Denn die Gezeiten sind eine zeitliche Strukturbildung. Genau wie bei räumlichen Strukturbildungen versuchen die Befragten die Unregelmäßigkeit der Struktur in naiver Weise durch Unregelmäßigkeiten in den Umgebungsbedingungen zu erklären (s. Kap. 2.2.2).

2.3.3 Fachdidaktische Leitlinien.

Um die Ergebnisse der fachlichen Klärung sowohl fachgerecht als adressatengerecht aufzubereiten, ist auch hier das *Model of Educational Reconstruction* (Duit et al., 2012) eingesetzt worden. Es sind dadurch die folgenden fünf Erklärschritte und zugehörige Beispiele entwickelt worden.

Erklärschritt I: Gravitation ist eine Anziehungskraft

Im Alltag macht sich die Gravitation vor allem durch das nach-unten-Fallen von Gegenständen bemerkbar und wird daher meist nicht weiter hinterfragt. Tatsächlich handelt es sich bei der Gravitation aber um eine Anziehungskraft zwischen allem, was eine Masse hat. Zwischen einem Gegenstand (z. B. ein Buch) auf einem Tisch und der Erde wirkt folglich eine Anziehungskraft. Newton hat herausgefunden, dass die Erde das Buch mit der gleichen Stärke anzieht wie das Buch die Erde. Gravitation ist eine symmetrische Kraft. Weil die Erde aber eine so viel größere Masse hat, reagiert sie sehr träge auf diese Kraft und bewegt sich kaum in Richtung Buch. Das Buch bewegt sich dafür sehr deutlich auf die Erde zu. Wir sehen, dass es schnell zu Boden fällt. Man denkt daher, dass die Erde aktiv ist und das Buch passiv. Aber im Grunde sind beide gleich aktiv. So ist es auch zwischen Erde und Mond: Die Erde zieht den Mond an und der Mond die Erde (und alles was sich auf ihr befindet).

Erklärschritt II: Die Gravitation zwischen zwei Himmelskörpern verformt sie

Die gegenseitige Anziehungskraft zwischen Erde und Mond wirkt auf der Verbindungslinie zwischen beiden Himmelskörpern. Die Stärke der Kraft hängt davon ab, wie weit die Himmelskörper voneinander weg sind. Je kleiner ihr Abstand ist, desto größer ist die gegenseitige Anziehungskraft (Abstandsgesetz). Das Gravitationsgesetz sagt sogar, dass die gegenseitige Anziehungskraft auf ein Viertel sinkt, wenn zwei Körper den doppelten Abstand einnehmen. Der Abstand ist also sehr wichtig. Die Gravitationskraft zwischen dem Mond und dem Teil der Erde, der dem Mond zugewandt ist, ist größer als die Gravitationskraft zwischen dem Mond und dem Teil der Erde, die dem Mond abgewandt ist. Der Effekt wird als "differentielle Gravitation" bezeichnet. Allein durch diesen Unterschied der Gravitation werden Himmelskörper verformt, in die Länge gezogen. Dies ist kaum merkbar bei festen Himmelskörpern wie dem Mond oder der Erde. Sie werden nur minimal verformt. Das bewegliche Wasser auf der Erde aber wird deutlich auseinandergezogen. Dadurch entstehen die zwei Flutberge und die zwei Ebbtäler. Ebbe und Flut entstehen also allein aus dem Grund, dass die Anziehungskraft

zwischen Erde und Mond mit dem Abstand abnimmt und sich die Himmelskörper und insbesondere bewegliches Wasser auf ihnen verformen. Drei Beispiele sollen das verdeutlichen.

Beispiel 1: Boot-Regatta

Bei diesem Beispiel (Abb. 16) geht es nicht um Gravitation. Es zeigt aber den Effekt der Verformung. Drei Boote, die unterschiedlich stark beschleunigen können, starten nebeneinander. Alle fahren in dieselbe Richtung (die steht im Beispiel für die gleiche Krafrichtung):

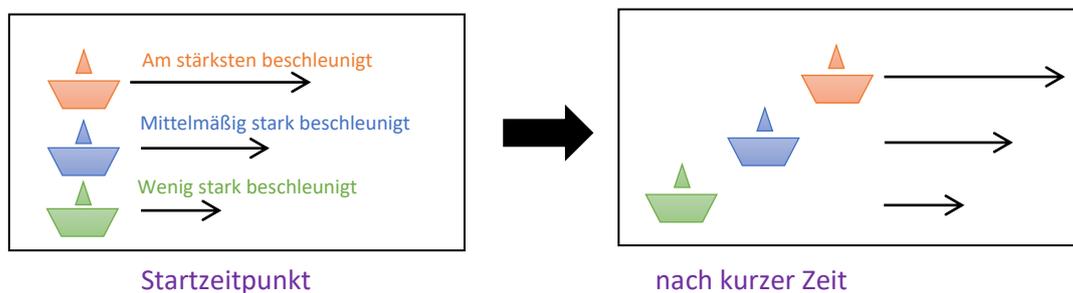


Abb. 16. Analogie zur Illustration der Verformung von Körpern im inhomogenen Gravitationsfeld

Wir fahren in dem Boot mit, das mittelmäßig stark beschleunigt (blau). Das am stärksten beschleunigte Boot (orange) fährt uns davon, es entfernt sich von uns. Das am schwächsten beschleunigende Boot (grün) fährt uns hinterher. Schaut man vom blauen Boot zurück auf das grüne, so nimmt man wahr, dass es sich ebenfalls von uns entfernt, obwohl es in die gleiche Richtung fährt wie wir. Es entfernen sich also beide Boote von uns. Die gesamte Regatta verformt sich, sie wird in die Länge gezogen. Dies kann als Analogie betrachtet werden: Die Regatta steht für die Erde. Die Ziellinie steht für den Mond. Die Ziellinie bewirkt auch eine "Anziehung" auf die Segler. Die gleiche Fahrtrichtung der Boote steht für die Richtung der Anziehung zwischen Erde und Mond. Die unterschiedlichen Beschleunigungen der Boote stehen für die unterschiedlichen Anziehungskräfte, je nach Abstand vom Mond. Das blaue Boot steht für den Mittelpunkt der Erde. Dass sich beide Boote (orange und grün) von uns entfernen, steht für die Flutberge, die auf beiden Seiten der Erde entstehen.

Beispiel 2: Theraband

Zwei Menschen nehmen je eine Seite eines Therabands (breites Gummi-Gymnastikband) fest in die Hand. Sie gehen in dieselbe Richtung. Allerdings macht eine der beiden Personen immer zwei Schritte pro Sekunde, während die andere Person nur einen macht (die Schritte sollen gleich groß sein). Mit der Zeit entfernen sich die beiden Personen voneinander und das Band wird gedehnt, obwohl sie in dieselbe Richtung gehen. Zeichnet man auf das Band einen Planeten aus Wasser, so wird dieser nach und nach verformt und auseinandergezogen. Es entstehen zwei "Flutberge" auf dem Gummiband. Dies kann als Analogie betrachtet werden: Die gleiche Gehrichtung der Personen steht für die Richtung der Anziehung zwischen Erde und Mond. Die unterschiedlichen Schrittzahlen für die unterschiedliche Stärke der Anziehung, je nach Abstand vom Mond. Die Person, die zwei Schritte pro Sekunde macht, wird in dem Beispiel also stärker "angezogen", der Mond befindet sich auf ihrer Seite. Dass sich das Gummiband dehnt, steht für das Auseinanderziehen des Wassers und die beiden Flutberge.

Beispiel 3: Kometen

Dass Gravitationskräfte eine Verformung hervorrufen, ist nicht allein zwischen Erde und Mond der Fall. Astronomisch gesehen, kommt das verbreitet vor. So wurde bspw. der Komet Shoemaker-Levy 9 beim Anflug auf den Jupiter durch die Gravitation zunehmend verformt und riss letztlich auseinander, was sich in der Darstellung der NASA gut zeigt:

https://www.nasa.gov/mission_pages/herschel/multimedia/pia17007.html

Erklärungsschritt III: Fliehkraft sorgt für ein stabiles Erde-Mond-System

Erde und Mond ziehen sich also gegenseitig an und erzeugen Verformungen. Aber warum stürzen Erde und Mond nicht irgendwann aufeinander? Das bleibt glücklicherweise aus, weil sich Erde und Mond um einen gemeinsamen Punkt drehen, ihren gemeinsamen "Schwerpunkt". Dieser Schwerpunkt liegt wegen der viel größeren Masse der Erde näher bei der Erde als beim Mond. Er liegt sogar noch innerhalb der Erde. Durch die Drehbewegung entsteht eine Fliehkraft nach außen wie bei jedem rotierenden System. Als das System Erde-Mond entstanden ist, hat es sich gerade so eingestellt, dass Gravitation und Fliehkraft im Gleichgewicht sind. Der Abstand zwischen Erde und Mond ist nahezu konstant. Gravitation und Fliehkraft gleichen einander aus und es entsteht eine stabile Bewegung von Erde und Mond um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. So erleben wir Flut und Ebbe, ohne dass die Gefahr einer Kollision zwischen Erde und Mond besteht.

Erklärungsschritt IV: Täglicher zeitlicher Versatz der Tiden

Während Erde und Mond sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen, rotiert auch die Erde um ihre eigene Achse. Mond und Erde benötigen einen Monat für ihre Bewegung um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, die Erde bekanntlich einen Tag für ihre Eigenrotation. Der tägliche Versatz der Gezeiten von etwa 52 Minuten lässt sich so erklären: Nach einem Erdtag (24 Stunden) hat sich das Erde-Mond-System um ungefähr ein 29stel der vollständigen Bewegung um ihren gemeinsamen Schwerpunkt weitergedreht. Nach knapp 29 Erdtagen hat sich der Mond also einmal um die Erde bewegt. Die Richtung zum Mond hat sich also geändert. Der Mond braucht jeden Tag rund einen 29stel Tag länger, bis man ihn in der gleichen Himmelsrichtung sieht. Das entspricht den rund 52 Minuten. Damit hat sich auch die Ausrichtung der Flutberge etwas verändert, die Flut "verspätet sich" jeden Tag um 52 Minuten.

Erklärungsschritt V: Land beeinflusst die Gezeitenwellen

Wenn die Erde komplett mit Wasser bedeckt wäre und die Meere überall gleich tief, dann wären die Flutberge nur ca. 50 cm hoch, also kaum bemerkbar. Auf der Erde gibt es aber Kontinente, Inseln, Küsten, Meerengen und Meeresbecken wie die Nordsee, auf die die Flut trifft. Dort schaukeln sich die Gezeitenwellen auf. Es kann ein sehr hoher Tidenhub entstehen, also ein großer Unterschied zwischen Niedrigwasser und Hochwasser. Dieser Unterschied kann bis zu 14 Meter erreichen (Frankreich, Nordamerika). In der Nordsee

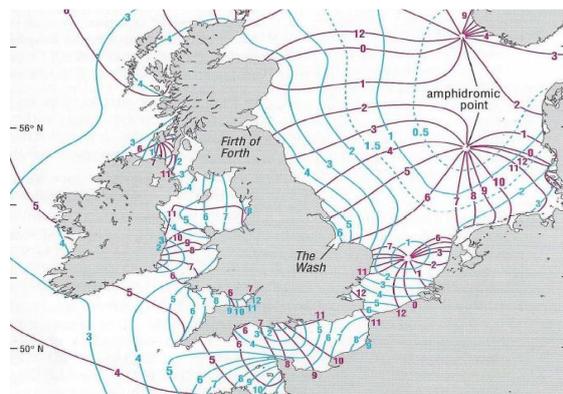


Abb. 9. Wechselwirkung der Gezeitenströmung in der Nordsee; Bildung von Amphidromien (The Open University, 2000)

beträgt der Tidenhub ca. 2,5 Meter. Da die Nordsee ein fast geschlossenes Becken ist, gibt es hier einen merkwürdigen Effekt: Die Gezeitenwelle läuft im Kreis an den Küsten der Nordsee entlang, gegen den Uhrzeigersinn, denn das Wasser der Nordsee wird durch die Anziehung zwischen Erde und Mond zu dieser Bewegung angeregt. Es ergeben sich dabei sogar Stellen in der Nordsee, an denen es aufgrund dieser merkwürdigen Bewegung gar keinen Tidenhub gibt. Man nennt diese Stellen Amphidromien (Abb. 9). Dies kann in der nebenstehenden Abbildung für die Nordsee betrachtet werden.

Beispiel 4: Das Urlaubstelefonat

Jemand macht auf der Nordseeinsel Texel Urlaub. Er stellt um 12 Uhr mittags fest, dass Niedrigwasser ist. Er telefoniert mit einem Freund in Wilhelmshaven, der mitteilt, dass dort gerade Hochwasser ist. Das ist insofern verwunderlich, als die Orte gar nicht so weit voneinander entfernt sind und daher ein so großer Unterschied der Wasserstände überrascht. Die Erklärung dieses Phänomens ergibt sich durch die umlaufende Gezeitenwelle in der Nordsee.

Erklärungsschritt VI: Die Gravitation der Sonne tritt hinzu

Was sich zwischen Erde und Mond aufgrund der Gravitation abspielt, geschieht auch zwischen Erde und Sonne als weiterer kosmischer Player. Genau wie zwischen Erde und Mond wirken auch zwischen Sonne und Erde Anziehungskräfte. Auch hier kommt es zu einer Verformung des Wassers auf der Erde. Auch hierdurch entstehen zwei Flutberge und zwei Ebbetäler. Deshalb gibt es auf der Erde eigentlich stets vier Flutberge bzw. Ebbetäler – je zwei durch den Mond und durch die Sonne. Die durch die Sonne verursachten Flutberge sind aber nicht so hoch wie die durch den Mond bedingten. Die vier Flutberge überlagern sich, je nachdem wie Erde, Mond und Sonne zueinander stehen. Liegen Erde, Mond und Sonne etwa auf einer Linie, dann kommt es zu einer Verstärkung der Tiden. Man spricht von Springtiden. Liegen Erde, Mond und Sonne im rechten Winkel zueinander, liegen auch die Ausrichtungen der Flutberge im rechten Winkel zueinander. Die verstärkende Überlagerung findet nicht statt. Man spricht von Nipptiden.

Zusammenfassung

Durch die Anziehungskräfte zwischen Erde und Mond bzw. zwischen Erde und Sonne wird der Wasserkörper der Erde verformt. Es resultieren Hoch- und Niedrigwasser auf der Erde. Weil die Erde rotiert und sich daher der Ort des Hoch- und Niedrigwassers mit der Zeit verändert, nehmen wir diese Verformung als Ebbe und Flut wahr. Die Fliehkräfte im Erde-Mond-System balancieren die Anziehungskräfte aus und sorgen dafür, dass ein stabiles System vorliegt, in dem Ebbe und Flut periodisch auftreten. Die Fliehkräfte sind dabei nicht die Ursache von Ebbe und Flut, sondern verhindern das Aufeinanderstürzen der Himmelskörper. Auf einem Planeten mit Kontinenten werden die resultierenden Gezeitenwellen durch die Geomorphologie abgelenkt und es entstehen Effekte wie sehr starke lokale Tidenhübe, umlaufende Gezeitenwellen oder Amphidromien.

2.3.4 Präsentation auf einem Fachtag.

Auch dieser Fachtag richtete sich an Leitende und Mitarbeitende der Nationalparkhäuser sowie weiterer Bildungseinrichtungen an der Küste. Er stellte insofern ein Desiderat dar, als die Teilnehmenden am ersten Fachtag (Thema: Strömungen und Strukturbildungen im Küstenraum) deutlich gemacht haben, dass die vielen parallel existierenden Erklärungsansätze zum Thema Ebbe und Flut bei ihnen Verunsicherung und Überforderung hervorrufen. Um den Fachtag an die Wünsche der Teilnehmenden anzupassen, wurden sie vorab angeschrieben und gebeten, Erklärungsansätze zum Thema Ebbe

und Flut zu übermitteln, die entweder bereits in ihren Bildungseinrichtungen eingesetzt werden oder bei denen sie sich unsicher sind, inwiefern sie fachlichen Ansprüchen genügen. Die Erklärungsansätze wurden im Vorfeld analysiert und kategorisiert. Das Ziel der Veranstaltung war es nicht etwa, einen korrekten Erklärungsansatz darzustellen, sondern verschiedene Erklärungsansätze daraufhin zu diskutieren, ob sie aus physikalischer Sicht in Ordnung sind. Auch die Gleichwertigkeit von Ansätzen, die zunächst unvereinbar erscheinen, wurde zusammen mit den Teilnehmenden fachlich geprüft. Es stellte sich dann die Aufgabe, eine oder mehrere Darstellungsweisen zu finden, die auch fachlich angemessen und auch für Besuchende verstehbar sind.

Bei der Durchführung der Veranstaltung wurde ein breites Spektrum von Erklärungen diskutiert. Diese reichten von fachlich nicht haltbaren Erklärungen, über fachlich zwar angemessene, aber für Besuchende schwierig verstehbare Ansätze, bis hin zu Ansätzen, die sowohl fachlich angemessen als auch für Besuchende verständlich sind. Es ist deutlich geworden, dass in vielen Bildungseinrichtungen noch Erklärungen eingesetzt werden, die aus physikalischer Sicht unangemessen und irreführend sind: Sehr häufig wird fälschlicherweise dargestellt, der mondzugewandte Flutberg werde durch die Gravitationskraft des Mondes hervorgerufen. Der mondabgewandte Flutberg entstehe hingegen durch die Fliehkräfte im Erde-Mond-System. Ein weiteres Problem bei den Erklärungen der Teilnehmenden ist die Vielzahl der gleichzeitig vorhandenen Erklärungselemente und unklaren Bezüge. So werden in den Erklärungen gleichzeitig die beiden Flutberge verdeutlicht, zusätzlich der Einfluss der Sonne bezüglich Spring- und Nipptiden diskutiert und ferner der tägliche Versatz der Gezeiten von etwa 50 Minuten betont, der aus der Bewegung des Erde-Mond-Systems resultiert. Dies macht die Erklärungen so komplex, dass die Besuchenden nicht mehr in der Lage sind, sie nachzuvollziehen.

Deshalb wurde auf Basis jener Erklärungsansätze, die von den Teilnehmenden übermittelt wurden, die im vorigen Kapitel genannten Erklärschritte entwickelt und bei der Veranstaltung vorgestellt, die die verschiedenen Erklärungen in einer Folge darstellt, bei der die Anzahl der Erklärungselemente schrittweise zunimmt: Die Gezeiten werden zunächst nur aus lokaler Perspektive betrachtet. Erst danach wird zu einer globalen, lunaren und schließlich zu einer solaren Perspektive übergegangen, um die jeweiligen zugehörigen Phänomene (Flutberge, Spring- und Nipptide, Gezeitenversatz) entschlüsseln zu können. Die Problematik der falsch zugeordneten Erklärungselemente (Gravitationskraft und Fliehkraft) zu den beiden Flutbergen wird durch das Konzept der differentiellen Gravitation aufgelöst: Die Gravitation des Mondes bzw. der Sonne bewirkt eine Verzerrung des Wasserkörpers auf der Erde. Hierdurch entstehen bereits die zwei Flutberge. Die Fliehkräfte sind für die Entstehung der Flutberge demnach also nicht erforderlich. Sie sind jedoch von entscheidender Bedeutung für die Stabilität des Erde-Mond-Systems: Nur weil die Fliehkräfte die wirkenden Gravitationskräfte ausbalancieren, halten Erde und Mond ihren Abstand zueinander und stürzen nicht ineinander.

Für das Konzept der differentiellen Gravitation wurde ein kleiner Hands-On-Versuch entwickelt und vor Ort mit den Teilnehmenden durchgeführt. Bis heute bestehen bezüglich der Gezeiten intensive Kontakte mit den Leitenden der Nationalparkhäuser, die häufig mit den Projektmitarbeitenden in Kontakt treten, um sich bei ihren individuellen Erklärungen zu den Gezeiten in ihren Bildungseinrichtungen beraten zu lassen. Außerdem wird aus dem Projekt heraus mit einer Ausstellungsagentur und einem Lernort kooperiert, um einen Ausstellungsbereich zum Thema Gezeiten zu konzipieren.

Am Fachtag (s. Einladung, Abb. 17) nahmen 45 Personen aus 33 Bildungseinrichtungen teil:

- Nationalparkverwaltung
- NPH Wittbülten
- NPH Baltrum
- grün&bunt
- Natur- und Landschaftsführerin
- Wind-Wasser-Wellen
- Wattabenteuer
- Wattführer Neuharlingersiel
- Naturpädagogin, Wattführerin
- Wattführer in Schillig
- Lehrkräfte
- Hofmann-Kramer-Wattführungen
- 7x Wattführerin aus Niedersachsen
- NPH Wattenhuus Bengersiel
- NPH Juist
- Wattenmeer-Besucherzentrum
- Schutzstation Wattenmeer
- Wattführerin Upleward, Krummhörn
- Wattenmeer-Besucherzentrum, Wattführer
- NPH Museum Fedderwardsiel
- Wattwelten Norderney
- Nationalpark-Partner; Watt- und Inselführer
- NPH Carolinensiel
- 2x Wattführerin Nordfriesland bzw. Dithmarschen
- NPH Wurster Nordseeküste

2. Fachtag

für Leitende und Mitarbeitende der Nationalparkhäuser
und weiterer Bildungseinrichtungen an der Küste

Ebbe und Flut

Welche Erklärungsansätze sind fachlich
korrekt und für Besuchende verstehbar?

Montag, 17. Juni 2019, Universität Oldenburg
Campus Wechloy, Raum W2 1-143, 13-16 Uhr

Programm

- 12:30 offene Kaffeerrunde (davor ist ein Mensabesuch möglich)
- 13:00 **Ziel des Fachtages ist es, verschiedene Erklärungsansätze daraufhin zu untersuchen, ob sie aus physikalischer Sicht in Ordnung sind.**
Auch die Gleichwertigkeit von Ansätzen, die zunächst unvereinbar erscheinen, soll fachlich geprüft werden.
Es stellt sich dann die Aufgabe, eine oder mehrere Darstellungsweisen zu finden, die auch für Besuchende verstehbar sind.
darin variabel: Kaffeepause
- 16:00 **Ende des Fachtages**

Wir laden Sie herzlich ein, mit uns das zentrale Phänomen der Gezeiten und ihre didaktische Aufarbeitung zu diskutieren. Wir freuen uns auf Ihr Kommen! Die Teilnahme ist kostenlos. Anmeldung bitte bis zum 1. Mai 2019 unter michael.komorek@uni-oldenburg.de.

Annika Roskam, Kai Bliesmer und Michael Komorek

Abb. 17. Einladung zum Fachtag "Ebbe und Flut"

2.3.5 Anwendung der Leitlinien: Konzeption einer Erklärtafel

Unter Rückbezug auf die fachdidaktischen Leitlinien wurde im Rahmen einer Masterarbeit von Berghegger (2021) eine Schautafel zum Thema Gezeiten entwickelt und deren Wirksamkeit empirisch untersucht. Da auf einer Schautafel nicht alle der durch die Leitlinien repräsentierten Inhalte dargestellt werden können, wurde eine Auswahl getroffen. Folgende Bereiche werden behandelt:

- Änderung des Wasserstands sowie Periodizität von Ebbe und Flut als Charakteristika.
- Klärung des Unterschieds zwischen Ebbe und Flut sowie Hoch- und Niedrigwasser.
- Ausbildung von zwei Flutbergen aufgrund differentieller Gravitation.
- Stabilität des Erde-Mond-Systems durch Gleichgewicht zwischen Gravitation und Fliehkraft.
- Täglicher Versatz der Tiden um ca. 50 Minuten.

Der erste Entwurf einer Gezeitentafel ist in Abb. 18 dargestellt. Zur Erprobung der Tafel wurden problemzentrierte, teilstandardisierte und leitfadengestützte Interviews (Witzel, 1985) geführt. Der hierzu nötige Leitfaden wurde ebenfalls empirisch gestützt entwickelt, indem zwei Probeinterviews durchgeführt wurden, sodass aus der Reaktion der Proband:innen in diesen Probeinterviews Verbesserungen am Leitfaden vorgenommen werden konnte. Die Erprobung der Tafel selbst erfolgt im Rahmen der Masterarbeit von Berghegger (2021) mit 5 Proband:innen. Das Interview wurde online geführt und gliederte sich in drei Bereiche: Zunächst wurden Fragen zu den o. g. Phänomenbereichen gestellt, um in Erfahrung zu bringen, mit welchem Vorwissen und Vorstellungen die Proband:innen in das Interview gehen. Im Anschluss wurde die Tafel gestreamt und die Befragten hatten die Gelegenheit sie so lange zu betrachten, wie sie wollten. Im Anschluss wurden ihnen dann Fragen rund um die Phänomenbereiche gestellt, zu denen auf der Schautafel berichtet wurde. Jedes Interview dauerte etwa 30 Minuten. Sie wurden transkribiert und der erhaltene Text mit einer qualitativen Inhaltsanalyse (Kuckartz, 2018) ausgewertet. Aus dem Vergleich zwischen dem erhobenen Vorwissen und den empirisch untersuchten Vorstellungen nach dem Betrachten der Tafel konnte auf das durch die Tafel konstruierte Wissen geschlossen werden. Dabei wurde zum einen Wissenszuwachs festgestellt (grün). Zum anderen zeigten sich jedoch auch noch nach dem Betrachten der Tafel fachlich unangemessene Vorstellungen bzw. Verständnisprobleme (rot):

- Die Änderung des Wasserstands wurde von allen als Charakteristika der Gezeiten erkannt.
- Die meisten Proband:innen beschreiben den Unterschied zwischen Ebbe und Flut sowie Hoch- und Niedrigwasser korrekt.
- Alle beschreiben die Abstandsabhängigkeit der Gravitationskraft als zentrale Ursache für die Entstehung der Gezeiten.
- Die meisten Befragten sind in der Lage die Stabilität des Erde-Mond-Systems unter Berücksichtigung der Fliehkraft zu erklären.
- Alle Interviewten können den täglichen Tidenversatz beschreiben und erläutern.
- Lediglich zwei Befragte beschreiben Flutberge auf beiden Seiten der Erde, sind jedoch nicht in der Lage, deren Entstehung schlüssig zu erklären.
- Lediglich zwei Proband:innen beschreiben die Umwälzbewegung von Erde und Mond korrekt und verfügen über eine angemessene Vorstellung von der Rolle des Baryzentrums.

Auf Grundlage der empirischen Untersuchung wird die Tafel nun im Sinne eines iterativen Vorgehens noch einmal von Berghegger (2021) überarbeitet und abermals erprobt.

Wie entstehen eigentlich die Gezeiten?

Maja will mittags eine Wattwanderung machen. Sie fragt deswegen einen Wattwanderer nach einer Führung.

Aktuell sollten wir nicht losgehen. In einer Stunde haben wir Hochwasser.

Ich dachte der Mond verursacht Hochwasser! Und tagsüber ist der Mond doch gar nicht da!



Hat der Wattwanderer also gelogen? Nein, denn: **Hoch- und Niedrigwasser können sich zu jeder Tageszeit einstellen.**

Bei Flut strömen Wassermassen zur Küste, und der Wasserstand steigt. Ist das Hochwasser erreicht setzt die Ebbe ein und das Wasser beginnt abzufließen, bis schließlich das Niedrigwasser erreicht ist.



Du kannst die Änderung des Wasserstandes über die Zeit selber beobachten. Suche dir einen Punkt an der Nordsee aus und merke dir den Wasserstand. Betrachte dieselbe Stelle in ein paar Stunden nochmal und du wirst eine Veränderung feststellen.

Die Wasserstandsänderung gibt es nicht nur in der Nordsee: Überall auf der Welt herrschen Gezeiten. Scanne den QR-Code für eine Aufnahme aus der Bay of Fundy in Kanada



Dieser Effekt tritt nicht nur auf der Erde auf. Wenn du den rechtsstehenden QR-Code scannst, kannst du die Aufnahme eines Kometen sehen, welcher sich im Schwerfeld des Jupiters verzerrt:



Dann ist also nicht der Mond die Ursache für die Gezeiten?

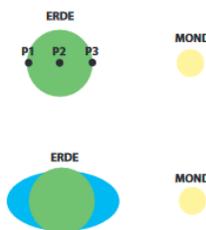
Aber wenn Erde und Mond sich anziehen, warum räumen sie sich dann nicht irgendwann?

Ich sollte eine Wanderung also am Besten einige Zeit vor dem Niedrigwasser beginnen. Aber wie kann ich diesen Zeitpunkt herausfinden?

Doch! Genauer gesagt bewirkt die zwischen Erde und Mond wirkende **Gravitation**, dass sich Erde und Mond anziehen. Je kleiner der Abstand zwischen Erde und Mond, desto größer ist die Anziehung zwischen ihnen. Aus diesem Grund ist die Anziehung zwischen Erde und Mond an verschiedenen Punkten auf der Erde unterschiedlich groß.

Betrachten wir Erde und Mond „von außen“. Der Punkt P1 auf der mondabgewandten Seite ist am weitesten vom Mond entfernt. Der Punkt P2 liegt etwas näher am Mond und der Punkt P3 auf der mondzugewandten Seite weist die kürzeste Distanz zum Mond auf. Wo ist nun die Anziehung am Größten und wo am Kleinsten?

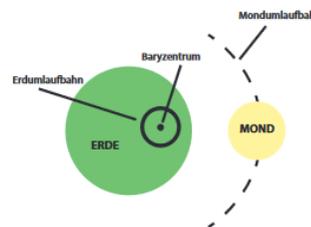
Im Punkt P1 ist die Anziehung am kleinsten, im Punkt P2 ist sie etwas größer und im Punkt P3 am größten.



Die unterschiedliche Anziehung bewirkt, dass die Erde etwas auseinandergezogen, also verzerrt wird. Diese Verzerrung wirkt sich nur sehr schwach auf den festen Erdkörper aus, aber bei den Wassermassen sieht es anders aus: Sie verzerrten sich deutlich und nehmen die Form von einem Ei an. So entstehen zwei Flutberge und zwei Ebбетäler.

Gäbe es nur die Anziehung zwischen Erde und Mond, würden sich Erde und Mond immer weiter annähern und schließlich ineinanderstoßen. Dies geschieht in der Realität jedoch nicht, weil die Anziehung durch eine **Fliehkraft** ausgeglichen wird. Diese entsteht dadurch, dass sich Sonne und Mond um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, das **Baryzentrum**, drehen. Das Baryzentrum liegt innerhalb der Erde.

Aufgrund des Ausgleichs von Anziehung und Fliehkraft stellt sich also ein Gleichgewichtszustand ein. Somit ist die Bewegung von Erde und Mond stabil.



Weil sich Erde und Mond umeinander drehen, ändern sie ihre Lage zueinander und damit auch die wirkende Anziehung. Dadurch verschieben sich Flutberge und Ebбетäler auf unserem Planeten, wodurch sich entsprechend Hoch- und Niedrigwasser einstellen. **Hoch- und Niedrigwasser verschieben sich jeden Tag um ungefähr 50 Minuten.** Diese Zeitverschiebung wird Tidenversatz genannt. Der Tidenversatz entsteht dabei aufgrund der sich verändernden Anziehung aufgrund der Bewegung von Erde und Mond.

Die Erde dreht sich innerhalb eines Tages um sich selbst, während der Mond die Erde in ungefähr 29 Tagen umrundet. In der Zeit, in der sich die Erde einmal um sich selbst gedreht hat, hat der Mond also ca. ein 29-stel seiner Umlaufbahn zurückgelegt. Damit Erde und Mond nun die gleiche Ausgangsposition zueinander haben, muss sich die Erde ein entsprechendes Stück weiterdrehen. Dies dauert ungefähr 50 Minuten.

Für eine Animation der Bewegung von Sonne und Mond scanne den QR-Code:



In einem Tidenkalender kann man die voraussichtliche Uhrzeit und Wasserstandshöhe von Hoch- und Niedrigwasser nachgucken. Ein Beispiel kannst du mit Hilfe des QR-Codes sehen:



Du kannst den Ausgleich von Gravitations- und Fliehkraft in einem einfachen Experiment nachstellen. Für die Experimentieranleitung scanne hier rechts:



Abb. 18. Erster Entwurf einer Gezeiten-Schautafel, mit der eine empirische Untersuchung durchgeführt wurde

2.4 Schwerpunkt D: Entwicklungsforschung mit Exponaten zu den aufbereiten Themen

Zentraler Fokus des Projekts war die Implementation von Phänomenen der physikalischen Dynamik an der Küste, im Ozean und im Wattenmeer in die non-formalen Angebote der Bildungseinrichtungen an der norddeutschen Küste. Da diese in ihren Ausstellungen vornehmlich auf Exponate setzen, wurde im Projekt beschlossen, ebenfalls Exponate zu entwickeln. Diese sollten gemäß fachdidaktischen Kriterien und Modelle hergestellt werden, die schon seit langem im Bereich des formalen Lernens zur Weiterentwicklung von Schulunterricht herangezogen bzw. eingesetzt werden: Die Exponate werden im Rahmen von Aktivitäten der Entwicklungsforschung entworfen. Das bedeutet, dass zunächst Prototypen auf Basis von Literaturrecherchen nach bestem fachdidaktischem Wissen hergestellt werden. Diese bieten dann die Möglichkeit, empirisch zu untersuchen, wie Menschen auf entsprechende Exponate reagieren, wie sie mit ihnen umgehen und welche Denk- und Lernprozesse die Exponate auszulösen vermögen. Gewonnen Erkenntnisse werden sodann eingesetzt, um die Exponate zu verbessern, neue Exponate zu entwerfen und schließlich abermals zu erproben. Es handelt sich also um einen iterativen, zyklischen Forschungsansatz.

Dabei werden durch die Forschung einerseits die konkreten, untersuchten Exponate verbessert. Andererseits werden aber auch generalisierbare Erkenntnisse über den Umgang von Menschen mit fachdidaktisch entwickelten Exponaten deutlich. Es können demnach also ebenfalls Erkenntnisse gewonnen werden ("Lokale Theorien"), die über die konkreten Exponate hinausgehen. Ein solches Forschungsfahren wird in der Fachdidaktik als Design-Based Research (Design-Based Research Collective, 2003) bezeichnet. Beim Design handelt es sich um die entwickelten Exponate. Das Design bietet die Möglichkeit, fachdidaktische Forschung zu betreiben. In der folgenden Abbildung (Abb. 19) ist der in diesem Arbeitsschwerpunkt verfolgte Design-Based Research Ansatz grafisch dargestellt. Der gesamte Projektverlauf im vorliegenden Arbeitsschwerpunkt ist Ausdruck davon, sich durch diesen zyklischen Forschungsansatz zu bewegen, um immer bessere Exponate zu kreieren und gleichzeitig neue Erkenntnisse über fachdidaktisch motivierte Ausstellungsforschung zu generieren.

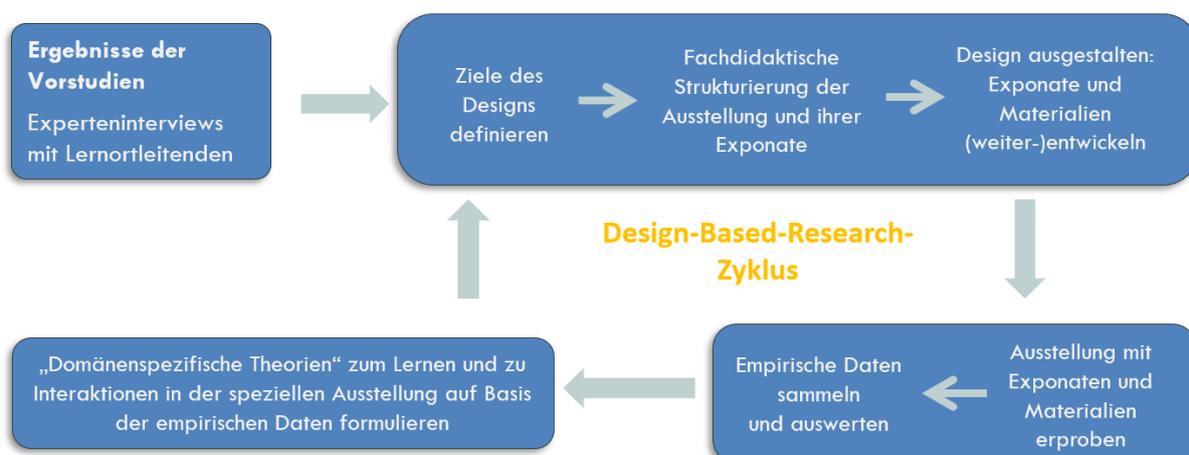


Abb. 19. Schematische Darstellung zum Design-Based-Research-Zyklus zur Entwicklung von Exponaten

2.4.1 Erarbeitung eines fachdidaktischen Ausstellungskonzepts (Aug.2016 - Okt. 2016)

Auf der Grundlage der Bedarfserhebungen, der Kooperationsgespräche und etablierten fachdidaktischen Konzepten wurde ein Ausstellungskonzept entwickelt, das auf die intensive mentale Interaktion der Nutzer:innen mit den Ausstellungsexponaten zur physikalischen Dynamik von Küste und Watt setzt. Die Abb. 20 unterstreicht, dass Exponate in diesem Konzept mehrere Funktionen erfüllen sol-

len. Beim Erstkontakt mit dem Exponat dient es als "Lieferant" für ein Phänomen. Das im Exponat beobachtbare Phänomen ist zwar künstlich hervorgerufen worden, hat in der Natur aber stets eine reale Entsprechung (z. B. Sandrippel). Am Exponat können die Besuchenden dieses Phänomen jedoch unter kontrollierten Bedingungen manipulieren, um mehr darüber zu lernen, als direkt in der Natur möglich ist. So lassen sich beispielsweise kleine Sandrippel an einem Exponat selbstständig erzeugen, beobachten und durch die Veränderung verschiedener Parameter manipulieren. Das am Exponat beobachtbare Phänomen reagiert also auf die Handlungen der Nutzer:innen und es werden gedankliche Verbindungen zum äquivalenten Phänomen hergestellt, das sich direkt in der natürlichen Umwelt beobachten lässt. Dies gelingt durch eine einbettende Lernaufgabe, die Nutzer:innen kognitiv anregt, ein mentales Bild von einem (geo-)physikalischen Zusammenhang in der Natur zu entwickeln. Hierzu werden Analogiebildungsprozesse zwischen dem Modell und dem realen System angeregt.

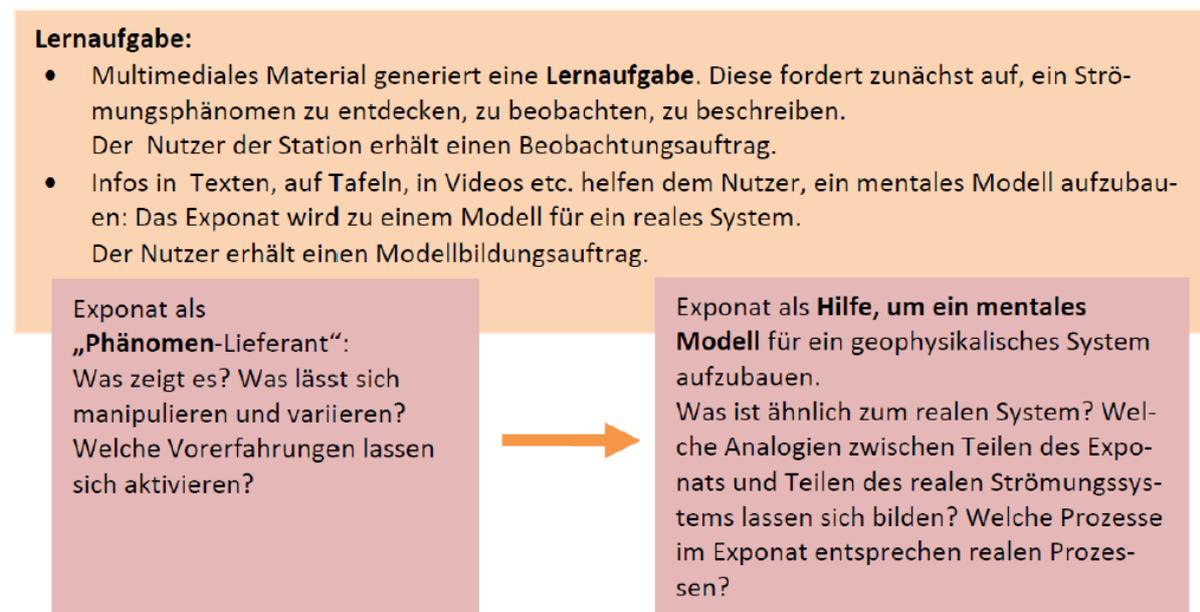


Abb. 20. Zusammenfassende Darstellung zum erarbeiteten Ausstellungskonzept

2.4.2 Entwicklung von Exponat-Prototypen und erste Erprobung (Nov. 2016 - April 2017).

Auf Basis des erarbeiteten Konzepts ist eine konkrete Ausstellung zum Thema Strömungen und Strukturbildungen mit fünf Exponaten erstellt worden. Dies geschah zusammen mit Physik-Studierenden des Master of Education im Modul "Moderne Physik und ihre didaktische Umsetzung". Rund 20 Studierenden waren tatkräftig an der Entwicklung der Prototypen beteiligt. Alle Exponate konnten äußerst kostengünstig unter Verwendung von Baumarktmaterialien realisiert werden, um sie unter kontrollierten Bedingungen im Lehr-Lern-Labor mit Schüler:innen zu erproben.

Die Ausstellung erhielt das Motto "Ursache – Strömung – Wirkung", was meint, dass vom Mikrobereich bis hin zum weltumspannenden Maßstab durchgängig Strömungen zu beobachten sind, die wesentlichen Einfluss auf die Strukturbildungen in der Natur haben. Strukturbildungen lassen sich in diesem Sinne als Wirkung von Strömungen interpretieren. Die fünf Exponate werden durch ihre Größenordnungen didaktisch strukturiert. Die Abb. 21 verdeutlicht das Konzept und damit die Ordnung der fünf Stationen der Rippelbildung (Meterbereich), Inselentstehung und -verlagerung (Kilometerbereich), Gezeitenwellen samt Einfluss, Tsunamis (tausende Kilometer) und des weltumspannenden

Strömungssystem (zehntausende Kilometer), zu dem auch der Golfstrom (Schildknecht, 2016) gehört.

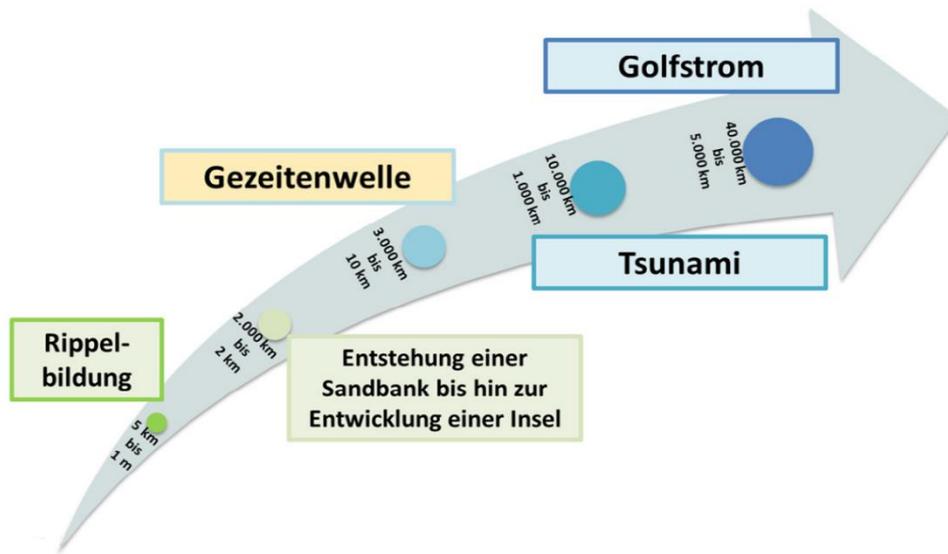


Abb. 21. Didaktische Strukturierung zur Prototyp-Ausstellung "Ursache – Strömung – Wirkung"

In allen Exponaten soll deutlich werden, dass jede Strömung eine Ursache hat, sie aber auch selbst wieder Ursache für weitere Phänomene an der Küste (z. B. Rippel, Dünen etc.) ist. Die im Mastermodul entwickelten Phänomene sind so konstruiert und mit Begleitmaterial ausgestattet, dass sie zum einen Phänomene produzieren und zum anderen mittels Analogiebildungen Zusammenhänge im realen geophysikalischen System verdeutlichen können. Die fünf Exponat-Prototypen sind auf den nachfolgenden Bildern dargestellt.

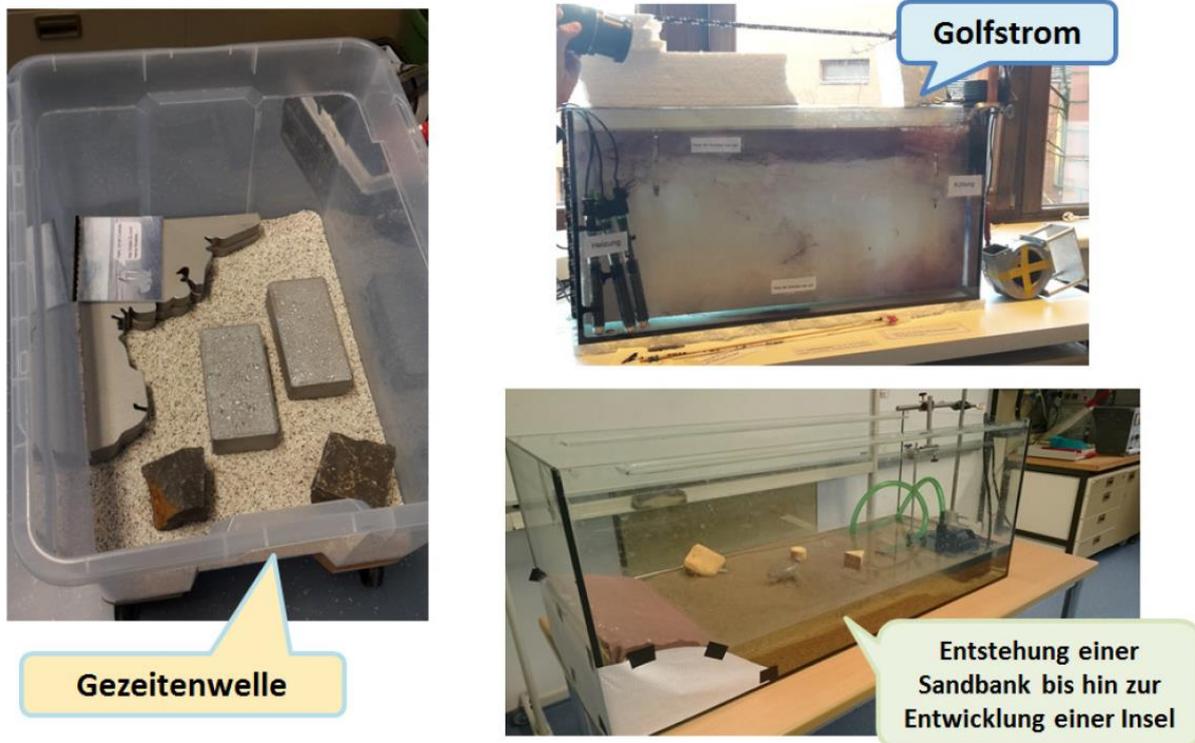


Abb. 22. Drei Exponat-Prototypen der ersten Ausstellungsversion in der Universität Oldenburg

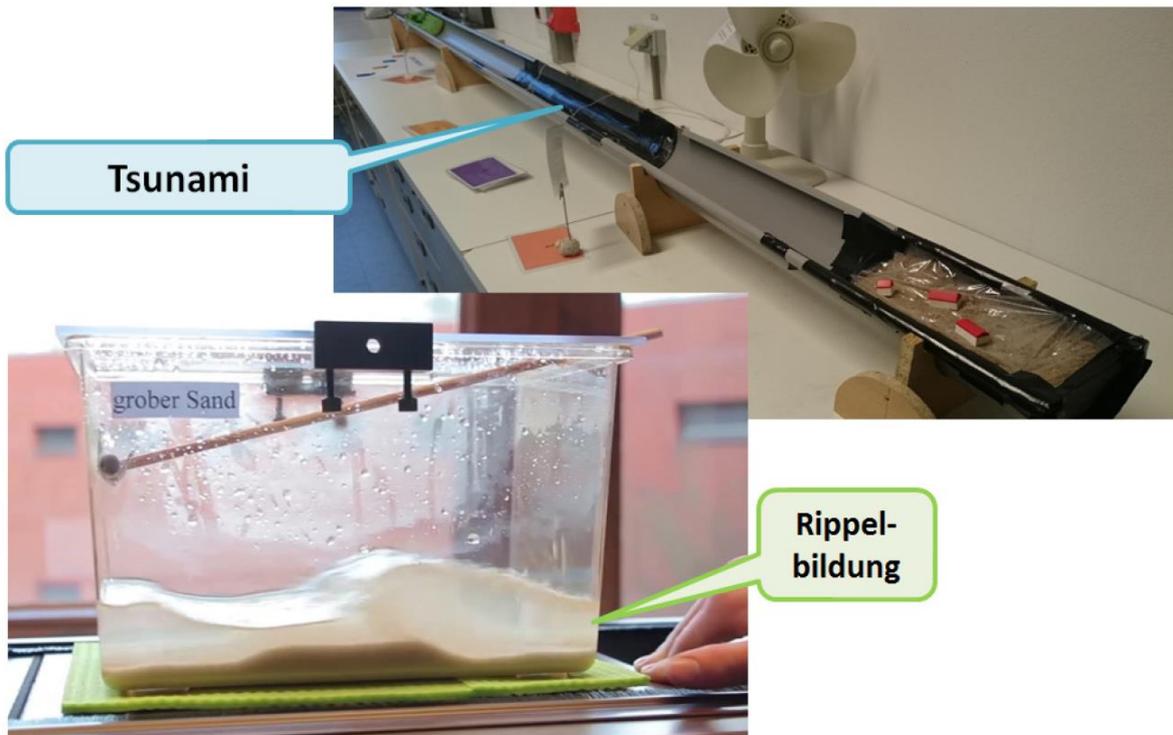


Abb. 23. Zwei Exponat-Prototypen der ersten Ausstellungsversion in der Universität Oldenburg

Zur Erprobung der Ausstellung wurde eine zehnte Schulklasse eines Oldenburger Gymnasiums in die Universität eingeladen, um die Exponate zu bedienen. Sie wurden dabei von den Studierenden des Mastermoduls unterstützt. Die Schüler:innen setzten sich mit allen Exponaten auseinander. Sie wurden zum einen dabei beobachtet und zum anderen im Anschluss des Ereignisses zu Schwierigkeiten und Verbesserungsmöglichkeiten befragt.

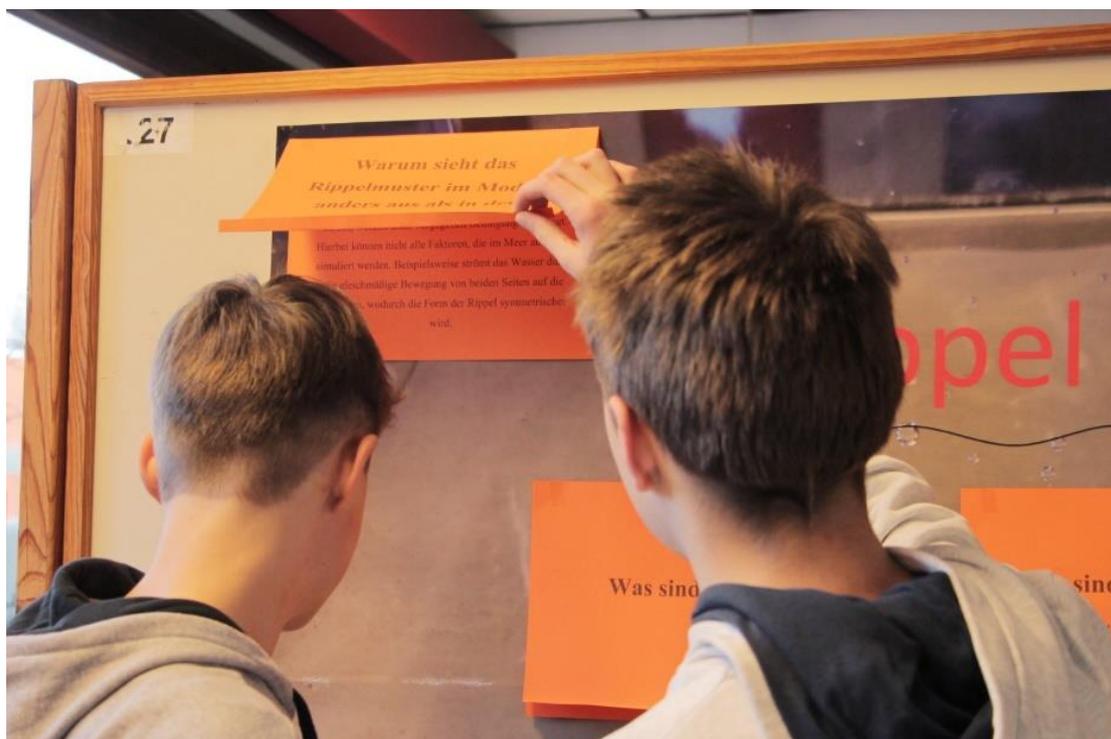


Abb. 24. Schüler:innen erproben die Exponate und das zugehörige Lernmaterial



Abb. 25. Schüler:innen geben schriftliches Feedback zu den Exponaten und Lernmaterialien

2.4.3 Weiterentwicklung der Exponate und Feldstudie im NPH Dangast (Mai 2017 - Juli 2017)

Durch die Erprobung der Exponat-Prototypen konnte die Ausstellung weiterentwickelt werden. Die Weiterentwicklung hat sich sowohl auf die handwerkliche Umsetzung der Exponate bezogen als auch auf das didaktische Konzept. Mit Blick auf die handwerkliche Umsetzung sind stabilere Varianten realisiert worden, die von Nutzer:innen auch ohne Beaufsichtigung bedient werden konnten und die sich daher prinzipiell für eine Feldstudie in einer realen Ausstellungssituation an einem außerschulischen Lernort eignen. Auf fachdidaktischer Ebene wurden fortan nicht nur Strömungen im Wasser, sondern auch in Luft betrachtet. Dadurch wurden manche Exponate im Hinblick auf Strömungen in der Luft überarbeitet, sodass diesbezügliche Phänomene akzentuiert wurden.



Abb. 26. Rahmung der Ausstellung "Ursache-Strömung-Wirkung"

Außerdem wurden umfangreiches Begleitmaterial (z. B. Poster, Erklärtafeln) konzipiert, das für die Nutzer:innen der Exponate Anleitungen, Beschreibungen und Erklärungen zu den jeweiligen Exponaten bereithielt. Auch dies diente dazu, dass die Exponate ohne ständige Beaufsichtigung bedient und entschlüsselt werden konnten. Bei der Weiterentwicklung der Exponate und des Begleitmaterials waren die folgenden fachlich-fachdidaktisch motivierten Leitlinien zu berücksichtigen:

1. Strömungen sind als Vermittler von Ursache und Wirkung darzustellen, sodass sie als zentrales Element bei der Entschlüsselung von physikalischen Phänomenen im Wattenmeer, an der Küste und im Ozean fungieren. Strömungen bilden eine übergeordnete Klammer. Sie sind das verbindende Element innerhalb der Ausstellung.
2. Die einzelnen Phänomene im Wattenmeer, an der Küste und im Ozean lassen sich verschiedenen thematischen Clustern zuordnen; z. B. wie Klima, Strukturbildungen, Starkwetterereignisse. Diese Cluster bilden Untereinheiten innerhalb der Ausstellung.
3. Die Phänomene an den Exponaten werden nicht nur unter fachphysikalischen Gesichtspunkten betrachtet, sondern sind jeweils auf soziale, ökologische und/oder ökonomische Kontexte bezogen, die den drei Säulen einer BNE entsprechen; gleichzeitig sind die betrachteten Phänomene Repräsentanten komplexer geophysikalischer Systeme und ermöglichen einen Zugang vom einfachen (kontrollierten) und strukturierten Exponat zur Komplexität der Realität.

Ausstellung im Nationalparkhaus Dangast. Über sechs Wochen im Juni und Juli 2017 war die weiterentwickelte Ausstellung im Nationalparkhaus Dangast der Öffentlichkeit zugänglich. Es fand eine Feldstudie statt. Zahlreiche Besuchende nutzten die Exponate und informierten sich somit über Strömungen und ihren Einfluss auf die Formung von Küste und Meer. Sie agierten mit den Exponaten mehr oder weniger in der beabsichtigten Weise. Die Besuchenden wurden dabei von den Projektmitarbeitenden sowie von Studierenden beobachtet und befragt, um Hinweise auf die Wirkung des überarbeiteten didaktischen Konzepts und der Exponate zu erhalten. Mehrere Bachelor- und Masterarbeiten sind in diesem Rahmen entstanden (Büchter & Przibilla, 2017; Heuer, 2017; Eberlei, 2017). Die Beobachtungen und Befragungen sind u. a. in den Abschlussarbeiten systematisch ausgewertet worden, um die Exponate und das Infomaterial weiterzuentwickeln. Der "Tag der Offenen Tür der Strömungsexperimente" am 15.06.2017 stellte einen gewissen Höhepunkt der Ausstellung dar. Auf diesen Tag wurde durch die Presse auf die Ausstellung großräumig aufmerksam gemacht, mehrere hundert Besucher:innen folgten dem Aufruf. Die Presse berichtete im Nachgang über diesen speziellen Tag. Am Tag selbst war das Radio (Nordwest-Radio) vor Ort und sendete eine Livereportage.



Abb. 27. Bewerbung des Tags der Offenen Tür der Strömungsexperimente in Dangast

Tag der offenen Tür der Strömungsexperimente

Donnerstag, 13. Juli, 14-18 Uhr
im Nationalparkhaus Dangast

Mitmach-Experimente: Strömungen selbst erzeugen!
Was bewirken sie?

Ursache – Strömung – Wirkung

Strömungen der Luft und des Wassers

Programm

- ab 14 Uhr: interaktive Mitmachexperimente für jung und alt
- 15 Uhr/17 Uhr: Ausstellungsführung und Kinder-Ausstellungsrallye
- Kaffee und selbstgebackener Kuchen Eintritt frei

eine Kooperation mit



gefördert durch die Deutsche
Bundesstiftung Umwelt



Nationalpark-Haus Dangast , Zum Jadebusen 179

Nationalpark
Wattenmeer



NIEDERSACHSEN

Abb. 28. Einladung: Tag der Offenen Tür der Strömungsexperimente in Dangast um die Exponate zu erproben



Abb. 29. Interview der Projektmitarbeiter:innen am Tag der Offenen Tür der Strömungsexperimente

An dieser Stelle sei der Dank gegenüber dem Nationalparkhaus Dangast unter Leitung von Lars Klein ausgesprochen für alle Unterstützung und die Möglichkeit, die Ausstellung zu erproben.

2.4.4 Erarbeitung von Begleitmaterial und Analyse fremder Ausstellungen (Aug. 2017 - Dez. 2017). Begleitmaterialien für Schüler:innen zur beschriebenen Ausstellung "Ursache – Strömung – Wirkung" sind im Rahmen einer Masterarbeit erstellt worden (Viskupaitis, 2018). Diese Materialien bereiten Schüler:innen auf die Ausstellung vor, ohne Inhaltliches vorwegzunehmen. Darin wird u. a. an einem Beispiel der Modellbegriff thematisiert und die Frage angesprochen, was ein "Phänomen" ausmacht – zwei Aspekte, die bei den Ausstellungsexponaten eine wichtige Rolle spielen. Zur Nachbereitung werden weitergehende Informationen zu Strömungen (z. B. im Internet oder der Literatur) aufgeführt, die die Schüler:innen bzw. die Lehrkraft zur Vertiefung der Ausstellungsthemen auswählen können. Die Materialien sind mit Schulklassen erprobt worden. Für eine vorhandene Ausstellung mit dem Schwerpunkt der Windenergie im Nationalparkhaus Wangerland wurde in einer Bachelorarbeit ein ähnliches Begleitmaterial entwickelt. Außerdem wurden neue Experimentierstationen zur Untersuchung von Windkraftanlagen in die bestehende Ausstellung dort integriert (Fredeweß, 2019). In den Bachelorarbeiten von Ostendorf & Piplak (2018) sind zahlreiche Nationalparkhäuser daraufhin analysiert worden, welche physiknahen Exponate/Stationen vorhanden sind und welche physikalischen Inhalte dabei berührt werden. Diese Arbeiten dienen zum einen der Klärung, wo weitere Materialien zur Einbettung von Besuchen platziert werden können. Zum anderen boten die Arbeiten aber auch weitere Ideen für zusätzliche Exponate zu den Themen Priele, Animal Navigation und Gezeiten, die im späteren Projektverlauf auch tatsächlich realisiert wurden und die bereits bestehenden Exponate in der Ausstellung "Ursache-Strömung-Wirkung" ergänzten (s. Kap. 2.4.7, 2.4.8 und 2.4.9).

2.4.5 Weiterentwicklung der Exponate, Laborstudie an der Universität (Sep. 2017 - März 2018). Von September bis November 2017 und von Januar bis März 2018 war die Ausstellung in der Universität Oldenburg begehbar. Es fand eine Laborstudie statt. Hier wurden Besucher gezielt eingeladen, um Genaueres über deren Denk-, Interaktions- und Lernprozesse zu erfahren. Die Ergänzung der in

Dangast betriebenen Feldstudie durch eine Laborstudie an der Universität war insofern angezeigt, als in einer Laborstudie sehr konzentrierte und fokussierte Forschung möglich war. In einer reinen Feldstudie im Nationalparkhaus bringen die Besucherinnen und Besucher i. d. R. schmale Zeitkontingente mit, sodass umfangreiche Befragungen während und vor allem im Nachgang einer Begehung nur schlecht möglich sind. Außerdem ist die Atmosphäre im Feld nicht so stark abgeschirmt. Im Labor herrscht mehr Ruhe und auch ein "Abstand" zum üblichen Ausstellungssetting, das durchaus eingeübte und kontraproduktive Verhaltensmuster (z. B. oberflächliches Schauen) aktivieren könnte. Weil uns als Projektakteuren wichtig ist, feinkörnig zu klären, welche Lern- und Interaktionsprozesse bei Besuchenden an den Exponaten ablaufen und wie diese auf Basis von Forschungsliteratur zu interpretieren sind, erschien uns eine Mischung von Feld- und Laborstudien als gut geeignet, um die Vorteile beider Settings ausschöpfen zu können. Denn nur so gelingt es, das komplexe Wirkungsgefüge zwischen den Nutzer:innen und den Exponaten der Ausstellung besser zu verstehen. Ziel der Laborstudie in der Universität ist es daher, die Erkenntnisse direkt wieder zu nutzen, um die Exponate in der realen Ausstellung möglichst ertragreich für die Besuchenden zu gestalten und deren volles Lehr-Lern-Potenzial ausschöpfen zu können. Im Rahmen dieser Aktivitäten sind die Masterarbeiten von Bergmann (2018) und Dulle (2018) entstanden.

2.4.6 Finalisierung der Exponate und Feldstudie im NPH Norddeich (Mär. 2018 - Apr. 2018).

Die Ergebnisse aus der Feld- und Laborstudien führten zu einer abermaligen Verbesserung der Ausstellungsexponate rund um Strömungen und Strukturbildungen. Um die überarbeiteten Exponate zu testen, fand eine erneute Feldstudie statt: Ab März 2018 wurde die Ausstellung der Öffentlichkeit in der Seehundstation Nationalparkhaus in Norden zugänglich gemacht. Die Ausstellung wurde in vier Räumen auf ca. 80 m² so präsentiert, dass die Besuchenden einen guten Zugang zu den Exponaten hatten und die Exponate frei bedienen konnten, um sie zu manipulieren, eigene Erfahrungen mit der Erzeugung von Strömungen zu sammeln und diese auf Kontexte zu beziehen. Texttafeln haben dazu eingeladen, Analogien zu bilden zwischen den Exponaten und ihrem Korrelat in geophysikalischen Systemen, wie dem Tsunami, der umlaufenden Gezeitenwelle in der Nordsee oder der Erwärmung Nordeuropas durch den Golfstrom.

Die Veränderungen der neuen Version der Ausstellung gegenüber der 2017 im Nationalparkhaus Dangast präsentierten Version lagen in einer veränderten textlichen Darstellung an den Stationen und einigen technischen Veränderungen. Weiterhin ist das Ziel, dass sich die Besuchenden zunächst mit den verschiedenen Strömungsphänomenen befassen. Sie sollen das Phänomen zunächst sinnlich erfahren und genießen bevor ihnen fachliches Wissen dazu angeboten wird; also wofür die Exponate geophysikalisch stehen und in welchen Kontexten (Erwärmung Europas durch den Golfstrom; Küstenschutz; Sturmfluten etc.) sie eine Bedeutung haben. Erneut werden Nutzer:innen beobachtet und aktiv befragt. Studierende in ihren Abschlussarbeiten sind in diesen Prozess der Begleitung und Verbesserung der Ausstellung eingebunden. So wurde beispielsweise von Bergmann (2018) ein Flyer entwickelt und erprobt, der entlang der Exponate durch die Ausstellung führt. Der Flyer hat dadurch die Funktion eines sog. *Advanced Organizer* (Ausubel, 1960) inne, soll also den Nutzer:innen als ein verbindendes Element dienen und sie bei der gedanklichen Vernetzung der verschiedenen Exponate unterstützen. Um einen Einblick in die Exponate der Ausstellung zu bieten, sind in den folgenden Abbildungen (Abb. 30, Abb. 31, Abb. 32) Lernstationen rund um die Themen Wellen, Rippelmuster und Dünen dargestellt.



Abb. 30. Lernstation zum Unterschied von winderzeugten Wellen und Tsunamis



Abb. 31. Lernstation zur Entstehung von Rippelmustern

Während der Ausstellungserprobung beobachteten die Projektmitarbeitenden sowie zwei Studierende im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten (Tischer, 2018; Brand, 2018) die Nutzer:innen bei der Bedienung der Exponate. Teilweise wurden sie auch an den Exponaten befragt. Ziel der Beobachtungen und Befragungen war es zu klären, ob die Exponate und das schriftliche Material von den Besuchenden überhaupt genutzt werden und in welcher Weise, inwiefern sie die Exponate in der beabsichtigten Weise entschlüsseln können und inwiefern sie einen Bezug zwischen den Exponaten, die sie selbst anfassen und manipulieren konnten, und den physikalischen Systemen, für die sie stehen, herstellen können.



Mehrere hundert Einzelbeobachtungen und Befragungen sind durchgeführt worden. Diese haben wertvolle Hinweise für das Konzept der "Ausstellungstation als Lernaufgabe" (siehe Kapitel 2.4.1) liefern können. So wurde deutlich, dass verschiedene Besuchertypen unterschiedliche Zugänge zu den angebotenen Exponaten finden. Für viele Besuchenden ist es zunächst eine große Hürde, ihre Vorstellung abzulegen, wonach man in Ausstellungen nichts anfassen und manipulieren darf. Es war gerade für ältere Menschen befremdlich, aufgefordert zu werden, neu Erlerntes direkt wieder anzuwenden, indem sie an den Exponaten handelnd tätig werden.



Über die Erfahrungen und empirischen Ergebnisse wird im Detail in Tischer (2018) und Brand (2018) berichtet (s. Literaturliste). Es kann geschätzt werden, dass rund 2000 Besuchende der Seehundstation/Nationalparkhaus Norddeich einen Zugang zur neuen Ausstellung hatten und sich mit dem Phänomen der Strömung und Strukturbildungen eigenaktiv auseinandersetzen konnten. An

Abb. 32. Lernstation und Lernmaterial zur Entstehung von Dünen

dieser Stelle sei der Dank gegenüber der Seehundstation unter Leitung von Dr. Peter Lienau ausgesprochen für alle Unterstützung und die Möglichkeit, die Ausstellung zu erproben.

2.4.7 Neuentwicklung eines Exponats zu Priel (05.2018-09.2018).

Die Erfahrungen aus den zwei Labor- und Feldstudien haben einerseits dazu geführt, dass die konkreten Exponate kontinuierlich verbessert werden konnten. Andererseits konnten aber auch generelle Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wie Menschen mit solchen fachdidaktisch entwickelten, interaktiven Exponaten umgehen, wo Schwierigkeiten bestehen und wie sich verringern lassen. Aus diesem Grund bestand die Idee, die bisherigen Erfahrungen und Erkenntnisse zu nutzen, um Exponate zu neuen Themen rund um Strömungen und Strukturbildungen an der Küste zu konzipieren.

Aus dieser Idee heraus wurde ein neues Exponat – nach gleichem fachdidaktischem Konzept – entwickelt, das die Bildung von Prielen thematisiert. Das Objekt wurde im Rahmen einer Masterarbeit von zwei Studierenden (Stegemann & Wortmann, 2018) konzipiert. Es handelt sich um ein großes Sandbecken (60 cm x 120 cm) mit einem geschlossenen Wasserkreislauf und einer Pumpe, das erlaubt, Priele und Mäanderstrukturen im Sand zu produzieren. Auch dieses Exponat setzt auf die Interaktivität der Besuchenden mit den Objekten, indem Wassermenge, Fließrichtung, Position des Sandes und weitere Parameter variiert werden können, um den Effekt der entstehenden Strukturen zu untersuchen. Das Exponat ist wiederum in eine Lernstation eingebettet, die neben dem Exponat Handlungsanweisungen und Vorschläge umfasst, Erklärungsangebote bereithält und einen Bezug zur Priel- und Strukturbildung im Wattenmeer herstellt. Die folgenden Abbildungen zeigen die Station einmal in der Totalen (Abb. 34) und einmal im Detail (Abb. 33).



Abb. 34. Station zur Erzeugung von Prielen



Abb. 33. Verzweigte Prielstrukturen im Sandbecken

Das Exponat wurde in Zusammenarbeit mit den Werkstätten der Universität Oldenburg professionell erstellt und ist auf Robustheit ausgelegt. Damit geht es in seiner Umsetzung über die bisherigen Exponate hinaus, die nicht für den langfristigen Einsatz gedacht waren. Das Exponat und die gesamte Lernstation sind im Herbst 2018 in der Außenstelle des Nationalparkhauses Dangast im Haus des Kurgastes präsentiert und erprobt worden. An diesem Ort haben im Erprobungszeitraum rund 200 Besuchende das Exponat wahrgenommen, es ausprobiert und sich mit den Lernaufgaben befasst. Die Studierenden Wortmann und Stegemann beobachteten und befragten die Nutzer:innen bei ihren Handlungen am Exponat. Es zeigt sich, dass die Handlungen, die angeregt werden sollen, tatsächlich stattfinden, dass aber auch hier die Interaktionsmöglichkeiten von den Besuchenden typabhängig noch zu wenig genutzt werden und dass die meisten Besuchenden die Erklärungen, die an der Station angeboten werden, nicht richtig wahrnehmen. Daraus kann geschlossen werden, dass sie sich mit den Effekten, die sie erzielen, zufriedengeben, ohne Bedarf an der Erklärung der Entstehungsprozesse von Prielen und Mäandern verspüren. Für die Konstruktion von Exponaten samt Begleitmaterial ergibt sich daher die Forderung, dass die Phänomene so dargestellt und beschrieben werden müssen, dass sie für Laien als "frag-würdig" erscheinen. Offenbar ist das Überraschende an einem Phänomen für viele Menschen erst dann zu erkennen, wenn sie mit Blick auf den fachlichen Hintergrund des Phänomens schon über etwas Vorwissen verfügen. Ist dem nicht so, dann finden Lernende keinen Zugang zum Phänomen, sie finden es dann zwar immer noch interessant, nehmen es allerdings so hin und hinterfragen es nicht. Dieses Bedürfnis nach dem Hinterfragen eines durch das Exponat ausgelösten Phänomens gilt es anzuregen. Dies müsste ein Exponat, das durch Begleitmaterial flan-

kiert wird, aus unseren Erfahrungen heraus leisten. Über die konkreten empirischen Ergebnisse wird im Detail in Stegemann & Wortmann (2018) berichtet.

2.4.8 Neuentwicklung eines Exponats zur Himmelsmechanik bei Gezeiten (10.2018-06.2019).

Durch die Zusammenarbeit mit den Nationalparkhäusern ist im Rahmen der Ausstellungserprobung deutlich geworden, dass die pädagogisch Verantwortlichen an den Lernorten Unterstützung benötigen, um das besonders zentrale Phänomen der Gezeiten sowohl fachgerecht als auch lernendengerecht darstellen zu können. Da das Thema sowohl für die Leitenden der Bildungseinrichtungen als auch für deren Besuchende physikalisch anspruchsvoll ist, wurde im Projekt beschlossen, dass neben Strömungen und Strukturbildungen auch Materialien zum Gezeitenphänomen entwickelt werden. In Ergänzung zum durchgeführten Fachtag (siehe Kapitel 2.3.4), an dem der Fokus zum einen auf der Entstehung der beiden Flutberge durch differenzielle Gravitation und zum anderen auf der Stabilität des Erde-Mond-Systems infolge der wirkenden Fliehkräfte lag, wollten wir die Lernorte weitergehend unterstützen. Denn noch nicht eingehend betrachtet wurde die Bewegung des nunmehr als stabil begründeten Erde-Mond-Systems. Hier besteht jedoch ein großer Bedarf, da sich viele Menschen fälschlicherweise vorstellen, der Mond bewege sich um den Mittelpunkt der Erde. Handelsübliche Tellurien (Planetenmodelle) verdeutlichen zwar die Bewegung von Himmelskörpern sehr anschaulich, unterstützen allerdings diese fachlich unangemessene Vorstellung, da der Mond und die Erde an derselben Achse befestigt sind, sodass im Tellurium ebenfalls die Mondbewegung um den Mittelpunkt der Erde zu erkennen ist. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass eine solche Konstruktion einfacher zu bauen ist als ein Modell, das die Verhältnisse korrekt wiedergibt.

Aber natürlich darf die Einfachheit der technischen Umsetzung niemals ein Argument dafür sein, einen Sachverhalt physikalisch nicht angemessen darzustellen. Deshalb hat sich die Aufgabe gestellt, ein Tellurium zu konstruieren, das eine Himmelsmechanik ausdrückt, die fachlich angemessen ist: In Wirklichkeit bewegen sich Erde und Mond nämlich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt (Revolutionsbewegung), der als Baryzentrum bezeichnet wird. Gleichzeitig dreht sich die Erde um ihre eigene Achse (Rotationsbewegung). Da hier zwei unterschiedliche kreisförmige Bewegungen überlagert sind, ist es recht schwierig, sich die Bewegung des Erde-Mond-Systems gedanklich vorzustellen. Deshalb wurde im Rahmen einer ausgezeichneten Masterarbeit (Staebner, 2020) ein Modell für diese überlagerte Bewegung entwickelt, gebaut und erprobt, das gleichzeitig darstellt, dass es ein festes Zahlenverhältnis der Bewegungen der Erde um sich selbst und des Mondes um das Baryzentrum gibt. Außerdem kann das Modell demonstrieren, wie der tägliche Versatz der Gezeiten zustande kommt. Das Modell basiert auf einer Zahnradmechanik, die mit einem CAD-Programm konstruiert wurde. Auf Basis der technischen Planungen wurden die Bauteile mit einem 3D-Drucker hergestellt und so zusammengesetzt, dass ein erstes prototypisches Realmodell entstanden ist. Es ist auf den Fotografien in Abb. 35 und Abb. 36 zu sehen.

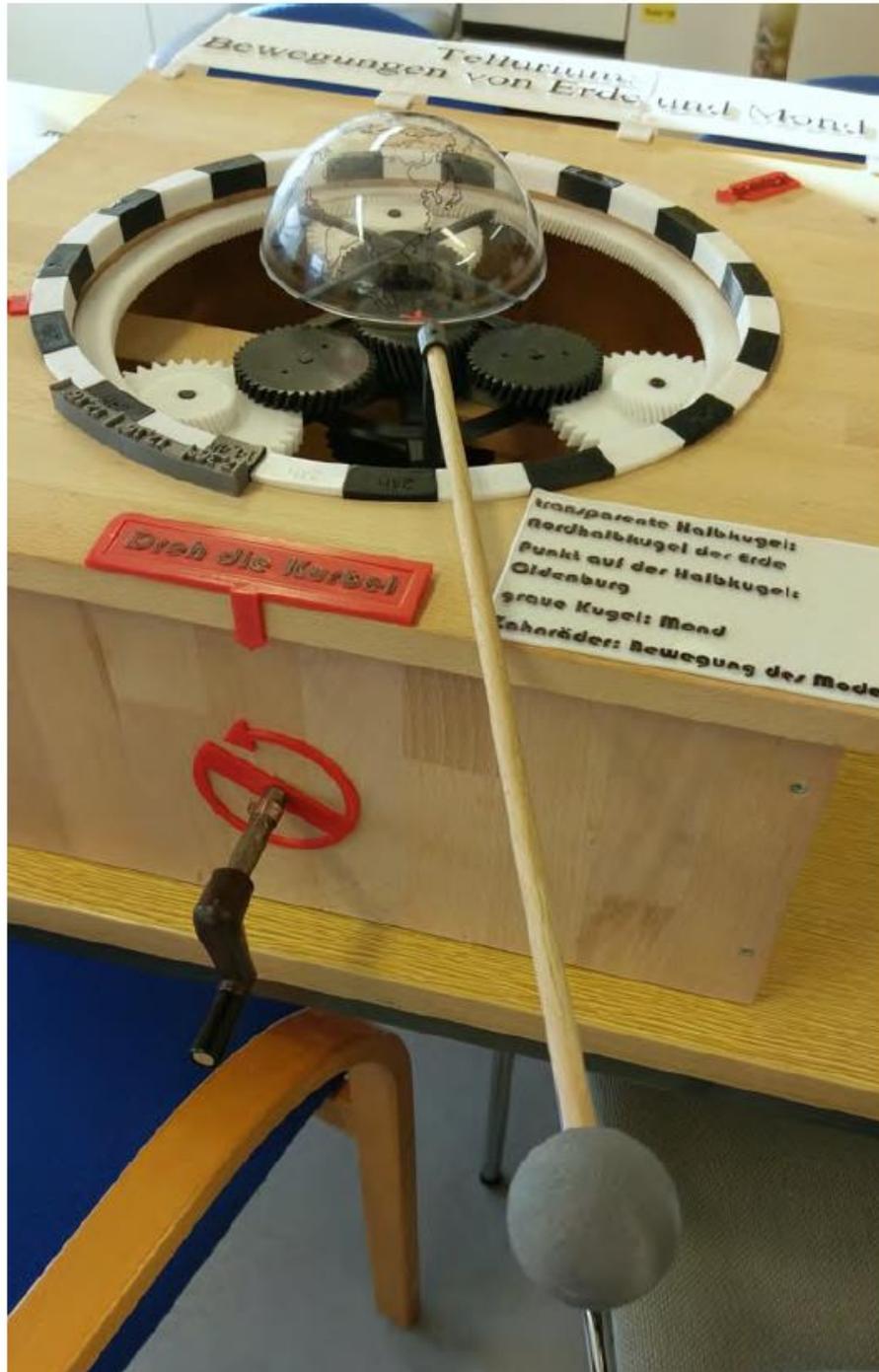


Abb. 35. Zahnradmodell, das die Erde-Mond-Bewegung um das Baryzentrum simuliert



Abb. 36. Zahnradkonstruktion zur Realisierung des nötigen Übersetzungsverhältnisses im Detail

Das Modell wurde nach dem Bau mit Probandinnen und Probanden getestet, um empirisch zu untersuchen, wie Besuchende mit dem Modell umgehen und welcher Erkenntnisgewinn für sie möglich ist. Es wurden interessierte Laien befragt, inwiefern sie beim ersten Zugang zum Modell einen Sinn erschließen und die Bauteile und Funktionen realen Situationen im Erde-Mond-System zuordnen können. Zum anderen wurden mit einer zweiten Gruppe von Befragten zunächst die Verhältnisse der Himmelsmechanik diskutiert, um dann zu prüfen, inwiefern diese die erarbeiteten Zusammenhänge im Exponat wiederfinden. Die Ergebnisse der Befragungen haben zu einer Optimierung des Modells beigetragen und die Erstellung von didaktischem Begleitmaterial ermöglicht. Das optimierte prototypische Modell wurde samt didaktischem Begleitmaterial im Wattenmeer-Besucherzentrum in Wilhelmshaven einer Agentur vorgestellt, die momentan damit beauftragt ist, die dortige Ausstellung grundlegend zu erneuern. Die Agentur und die Leitung des Wattenmeer-Besucherzentrums haben sich daraufhin entschlossen, den entstandenen Prototyp professionell und robust nachbauen zu lassen und in die Ausstellung zu integrieren. Das Realmodell wird dort ein sehr wichtiges Element in einem Ausstellungsbereich darstellen, der sich ausschließlich dem Gezeitenphänomen widmet (s. u.). Das Modell wird dort durch die Erklärungsansätze ergänzt, die auf dem zweiten Fachtag (siehe Kapitel 2.3.4) entwickelt worden sind. Es dient im Ausstellungsbereich insbesondere dazu, anhand des Vergleichs zwischen der Erdrotation und der Revolution im Erde-Mond-Systems zu zeigen und zu begründen, dass sich der Rhythmus der Gezeiten an jedem Tag um etwa 50 Minuten verschiebt.

2.4.9 Neuentwicklung eines Exponats zur Orientierung von Zugvögeln (04.2019 – 11.2019).

Die Zugvogeltage stehen bei den Nationalpark-Häusern im Oktober im Fokus, bisher meist mit biologischem, geographischem oder ästhetischem Schwerpunkt. Im Rahmen einer Masterarbeit von Biebert und Jaskulska (2020) wurde eine Station erstellt, in der sich die Besuchenden aus einer ergänzenden physikalischen Perspektive mit der Deklination und Inklinatation des Erdmagnetfeldes auseinandersetzen. Dies geschieht im Kontext des Zugvogels "Knutt", dem die Besuchenden von seinem Brutplatz in Russland zu seinem Überwinterungsort in Mauretanien den Weg weisen sollen. Dabei ist den Besuchenden allerdings der Überwinterungsort unbekannt. Durch die Station führt sie ein Weg-

weiser, der in den Kontext einführt, Übersicht über die Struktur gibt und die Möglichkeit bietet, Knutt mithilfe eines Kartenabschnitts seinen Weg zu weisen. Die Station gliedert sich in drei Teile, dem Phänomen der Deklination des Erdmagnetfeldes, dem seiner Inklination und einem Teil, bei dem es um das Finden des richtigen Flugwegs geht. Sowohl der erste als auch der zweite Teil bestehen aus einem Poster und einem Globus (Abb. 37). Am Globus werden die Fachbegriffe den Besuchenden anschaulich dargestellt, während die Poster eine schriftliche und bildliche Erklärung bieten. Zudem befinden sich auf dem Globus ablesbare Daten, mithilfe derer sich ein Raster bilden lässt. Dieses Raster zeichnen die Besuchenden auf den Kartenausschnitt des Wegweisers. Nun können sie mithilfe einer Beschreibung auf dem dritten Poster den Weg von Knutt zu seinem Überwinterungsort finden.



Abb. 37. Übersicht über die Lern- und Experimentierstation zur Orientierung von Zugvögeln

Die Lern- und Experimentierstation wurde im Rahmen der Zugvogeltage im UNESCO Weltnaturerbe Wattenmeer Besucherzentrum Wilhelmshaven ausgestellt. Die Handlungen der Besuchenden, die während dieser Zeit die Station bearbeitet haben, wurden beobachtet und die Besuchenden interviewt. Das Ziel dieser Untersuchung bildete das Rekonstruieren ihrer Handlungen und Denkprozesse. Viele Besuchende mussten zunächst einen Zugang zu der Station finden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Besuchenden die Station mit den vielen Anforderungen und der daraus resultierenden hohen Komplexität sowie deren Bedeutungszuweisung entschlüsseln mussten. Die direkte Verknüpfung zwischen Kontext und Fachbegriffen erfolgte beim Erstellen und Verwenden des Rasters. Die Besuchenden werden sich wahrscheinlich nicht den Fachbegriff "Deklination" merken, jedoch lernten viele, dass der geographische Nordpol und der in der Nähe liegende magnetische Pol nicht am selben Ort liegen und der Winkel zwischen ihnen eine Bedeutung für die Orientierung der Zugvögel hat. Der Begriff der Inklination wurde von den meisten Besuchenden allerdings nicht verstanden. Sie hatten Probleme damit, die Bedeutung der Magnetfeldlinien zu erfassen, auf deren Verlauf die Bedeutung der Inklination beruht. Trotzdem konnten alle Besuchenden den Weg zum Überwinterungsort von Knutt anhand der Daten des Magnetfelds finden. Durch eine Weiterentwicklung der Station besteht die Möglichkeit, mithilfe des Vorwissens der Besuchenden ein Verständnis für dieses aktuelle biophysikalische Forschungsfeld und das Phänomen der Animal Orientation aufzubauen. Es zeigt sich generell, dass dieser Themenbereich mit einer hohen Dichte an Fachbegriffen belegt ist, die durchaus zu Verständnisschwierigkeiten führen können, weil die Nutzer:innen mit ihrem Vorwissen Schwierigkeiten haben, anknüpfen zu können. Hier bedarf es bei einer künftigen Weiterentwicklung Materialien, die die Nutzer:innen dabei unterstützen, eine Verknüpfung zwischen ihrem eigenen Vorwissen und den dargestellten Fachinhalten herzustellen.

2.4.10 Generalisierende Auswertung von Befragungen im Feld und im Labor (Mai 2019 - Mär. 2020).

Alle bisherigen empirischen Untersuchungen rund um die Exponate bezogen sich stets darauf, die konkreten Exponate, mit denen Forschung betrieben wurde, zu verbessern. Sie sollten somit besser auf die Bedürfnisse, die Erwartungen und das Vorwissen der Nutzer:innen abgestimmt werden. Während der Projektlaufzeit sind so stetig bessere Exponate entstanden – sowohl mit Blick auf die technische Umsetzung als auch mit Blick auf die Anregung von Lernprozessen. Gemäß dem Ansatz des Design-based Research, geht es aber nicht nur darum, das konkrete Design (hier: die Exponate) zu optimieren, sondern auch generalisierbare Erkenntnisse über das Lernen von Menschen in interaktiven Ausstellungen zu gewinnen. Dies ist insofern bedeutsam, als solche Erkenntnisse auch über die hier im Projekt entwickelten Objekte hinaus über Geltung verfügen. Sie lassen sich daher auch von anderen Forscherinnen und Forschern nutzen, die selbst fachdidaktisch fundierte Ausstellungen entwickeln und weiterentwickeln möchten.

Um dieses Ziel der Generalisierung von Erkenntnissen zu erreichen, wurden sämtliche Beobachtungen und Befragungen von Nutzer:innen der Exponate aus allen Labor- und Feldstudien von der Projektmitarbeiterin Annika Roskam mit Blick auf generalisierbare Erkenntnisse zum Lernen in interaktiven Ausstellungen ausgewertet. In die Auswertung sind Daten aus der Feldstudie während der Präsentation der Strömung-Ausstellung in den Häusern in Dangast und Norddeich eingeflossen; hinzu kamen Befragungsdaten aus der Phase, in der die Ausstellung in den Laborräumen der Universität Oldenburg bestimmten kleinen Gruppen von ausgewählten Besuchenden zugänglich war. Die Nutzer:innen stammten aus den Gruppen Schüler:innen, Familien, Senioren:innen und Experten:innen, um eine Breite an Vorwissen, Interesse und Habitus abzudecken. Allein in den Laborstudien (Dulle, 2018; Bergmann, 2018) entstanden so Daten aus rund zwanzig bis zu vier Stunden ausgedehnten Begleitungen mit integrierten Beobachtungen und Befragungen. Und sie führen zweitens zu generalisierbaren Ergebnissen, wie Besuchende mit physikalischen Themen in Ausstellungen umgehen, wie sie die Angebote nutzen, welche kognitiven Prozesse bei ihnen ablaufen und wie diese mit ihren Handlungen und Interaktionen zusammenhängen. In diesem Arbeitsschwerpunkt ist eine Dissertation (Roskam, 2020) angefertigt worden, die mit Auszeichnung abgeschlossen wurde. In der Doktorarbeit wird eingehend über alle generalisierten Erkenntnisse zum Lernen in den Ausstellungen berichtet. Im Folgenden wird beispielhaft von einigen Generalisierungen berichtet.

- **Generalisierungsbereich *Lenkung von Entschlüsselungsprozessen*:** Die Studie ergab, dass Ausstellungsbesuchende bei der Interpretation von unbekanntem Exponaten intensiv auf Assoziationen und den Vergleich mit biografisch bekannten Situationen setzen. Dabei können sie durch bestimmte Hervorhebungen am Exponat oder im Begleittext in ihren Wahrnehmungen helfend gelenkt werden.
- **Generalisierungsbereich *Ziele bei der Verwendung von schriftlichem Material*:** Für die kognitiven Prozesse der Besuchenden und für ihre Handlungen am Exponat ist das begleitende schriftliche Material von hoher unterstützender Wirkung. Durch die wechselseitige Wahrnehmung dieses Materials und der Bestandteile des Exponats vergewissern sich die Besuchenden der Ziele an der Station (eigene sowie von außen herangetragene) und reduzieren Unsicherheiten hinsichtlich der Entschlüsselung der Objekte und ihrer notwendigen Handlungen. Am Exponat platzierte QR-Codes haben sich als nicht hilfreich und eher verwirrend erwiesen.
- **Generalisierungsbereich *Verknüpfung zwischen Material Handlungen und Beobachtungen*:** Hier hat sich gezeigt, dass die Besuchenden die angebotenen Hilfen, die zwischen den Objekten an der

Station und den Bezeichnungen der Objekte im schriftlichen Material eine Verbindung herstellen sollen, zwar nutzen, die Besuchenden aber oft auch kognitiv überlastet sind. Grund ist, dass das Exponat einerseits für sich steht, andererseits für einen lebensweltlichen Phänomenbereich wie z. B. den Tsunami. In der didaktischen Strukturierung von Exponaten ist daher auf ein dosiertes Angebot von Kontexten und Anregungen von Analogiebildungen zu achten.

- **Generalisierungsbereich *Verknüpfungen zwischen den Stationen der Ausstellung***: Die Besuchenden stellen von sich aus zwar häufig Oberflächenanalogien zwischen den Stationen her, aber selten strukturelle Analogien. Dies führt dann oft weg von den gesetzten Zielen der Ausstellung. Für die Gestaltung von Exponaten bedeutet das, dass die strukturelle Ebene, also was alle Exponate aus fachlicher Sicht miteinander verbindet, explizit angesprochen werden muss.
- **Generalisierungsbereich *Selbsterklärungen der Besuchenden***: Besuchende nutzen in ihren Erklärungen ihr Alltags-Vorwissen, sodass sie unerwartete Beobachtungen fachlich oft nicht korrekt interpretieren und sich die angebotenen Erklärungselemente zu wenig zu eigen machen. Sie fokussieren oft auf nebensächliche Merkmale der Exponate. In der Konsequenz ist darauf zu achten, dass eine Lenkung an der Station auf die fachlich relevanten Elemente erfolgt und Alltagsinterpretationen offensiv angesprochen werden.

2.4.11 Beratung einer Ausstellungsagentur zum Thema Gezeiten (12.2019-06.2021).

Bei der Zusammenarbeit zwischen Fachdidaktik, Ausstellungshaus und Ausstellungsagentur (vgl. Tab. 1) sind die unterschiedlichen Kompetenzen deutlich geworden, die für die professionelle Gestaltung von Ausstellungen notwendig sind. Agentur und Ausstellungshaus decken Kompetenzen hinsichtlich fachlicher Analysen und spezifischen Wissens über Entschlüsselungs- und Aneignungsprozesse der Besuchenden *nicht* komplett ab. Dieses Defizit kann verursachen, dass Potentiale, die das Ausstellungshaus hinsichtlich fachlichen Lernens und kontextualisierten Verstehens seiner Besuchenden prinzipiell aufweist, nicht ausgeschöpft werden.

Die Verantwortlichen der Häuser sind kompetent, über die fachliche Ausrichtung von Ausstellungen zu entscheiden, sofern diese nicht von außen vorgegeben sind. Bei den Nationalparkhäusern in Norddeutschland etwa ist vorgegeben, die Besonderheiten und den Schutzwert des Wattenmeeres zu thematisieren; bei Energiebildungszentren geht es um den nachhaltigen Umgang mit Energieresourcen; bei Museen sollen Teilbereiche historischer Realität abgebildet werden. Zudem sind die Häuser kompetent in der Einschätzung der Besucher:innenstruktur, deren geografischer Herkunft, Altersverteilung etc., da die Häuser in ihrer Bildungsregion verankert sind. Das Wissen über die Besucher:innenstruktur darf allerdings nicht gleichgesetzt werden mit einem Wissen über motivationale und kognitive Voraussetzungen sowie Bedürfnisse der Besuchenden.

Ausstellungsagenturen sind erfahren und kompetent, was die Erstellung eines Gesamtkonzeptes für eine Ausstellung angeht, etwa hinsichtlich des Raumkonzepts oder der zu realisierenden Ästhetik in Abhängigkeit von Inhalten und Botschaften. Sie sind zudem erfahren in der Inszenierung von Exponaten, deren Illumination, Positionierung im Raum und auch hinsichtlich der Digitalisierung von Exponaten oder Ausstellungsbereichen. Schließlich bringen Agenturen Erfahrungen mit der Besucher-Exponat-Interaktion ein. Diese bezieht sich vor allem auf die Interaktion auf Handlungsebene, was nicht mit der kognitiven Interaktion gleichgesetzt werden darf.

Essentielle Kompetenzbereiche fehlen aber, die lediglich die Fachdidaktik einbringen kann, die Kompetenz, fachliche Inhalte strukturiert zu analysieren (Stichwort: Elementarisierung, s. Kap. 2.2.1) und sie für Zwecke der Ausstellung didaktisch aufzuarbeiten. Und die Kompetenz, fachliche Lernprozesse zu planen und zu diagnostizieren. Der Fachdidakik geht es darum, Prozesse des fachlichen Verstehens und der Aneignung von Wissen einschätzen zu können. Denn die Besuchenden verfügen über sehr unterschiedliches Vorwissen und nutzen fachlich nicht immer angemessene Erklärungsmuster. Sie sind unterschiedlich aufnahmefähig und können ein Exponat nicht immer in der Weise entschlüsseln, wie es gemeint ist. Beide Kompetenzbereiche werden von der Fachdidaktiken mit dem Ziel eingebracht, *sachgerechte* Exponate zu entwickeln, die *adressatengerecht* ihre kognitive Wirkung entfalten.

Die propagierte Zusammenarbeit erwies sich im Beispiel des Nationalparkhauses an der Nordseeküste als fruchtbar. Für eine Station zum Thema Ebbe und Flut wurde ein erstes fachlich-didaktisches Konzept entwickelt: Studierende des Lehramts erarbeiteten Prototypen für die Station, u. a. ein sachgerechtes Modell für die Bewegung von Erde und Mond umeinander (Tellurium); weitere Teilstationen greifen fachlich nicht korrekte Alltagsvorstellungen der Besuchenden auf und fordern diese in der Interaktion mit Modellen heraus. Die Agentur erstellte daraufhin ein Umsetzungskonzept für die Station in enger Rückkopplung mit uns. Sie stellte zudem direkte Kontakte zwischen uns und Werkstätten her, damit die Produktion der Exponate eng am fachdidaktischen Konzept bleibt. Texte für die Exponate sind vom Ausstellungshaus und der Fachdidaktik gemeinsam formuliert worden.

Natürlich funktionierte in dieser Dreiecksbeziehung nicht gleich alles, aber die Kommunikationswege haben sich im zweijährigen Prozess eingespielt. Allerdings ist es bisher noch nicht gelungen, die aus mehreren interaktiven Exponaten, Texten und erklärenden Filmen bestehende prototypische Station mit Besucher:innen zu erproben und anhand empirischer Daten zu optimieren. Denn dazu müsste es die Agentur Personen ermöglichen, die die Exponate in einem vorläufigen Entwicklungsstand zu erproben und aus Rückmeldungen die Fertigstellung der Exponate zu optimieren. Da dies ist aber im gesamten Entwicklungsprozesse üblicherweise nicht vorgesehen ist und ist damit ein wesentlicher Schwachpunkt der Exponatentwicklung. Dennoch ergaben sich aus der bisherigen Zusammenarbeit wertvolle Einsichten, wie sich Ausstellungshaus, Agentur und Fachdidaktik im Dreieck einander annähern können.

2.4.12 Fazit und Outcome

Alle Ergebnisse dieses Projekts wurden in einer Broschüre für außerschulische Lernorte dargestellt. Auszüge der Broschüre befinden sich im Anhang. Sie stellt alle Projektergebnisse zusammenfassend dar.

2.5 Schwerpunkt E: BNE-Bildungsexkursionen

2.5.1 Unterrichtsexkursion 2016

Die Projektmitarbeiter:innen haben dieses erste Unterrichtsprojekt unter Beteiligung von 24 Studierenden der Universität Oldenburg, von denen einige im Projektzusammenhang ihre Masterarbeiten anfertigten, geplant und umgesetzt. Angeleitet und betreut wurden die Studierenden durch die Projektleitenden und durch Lehrkräfte der Hermann-Lietz-Schule auf Spiekeroog. Es wurde gemeinsam eine Unterrichtskonzeption zum Thema "Energie im und am Meer" und zum Thema "Küstenveränderungen" einschließlich des benötigten Unterrichtsmaterials entwickelt. Aufgeteilt in zwei Gruppen aus Studierenden, Projektmitarbeiter:innen und Lehrkräften der Schule wurde zunächst Unterricht zu den Themen durchgeführt. Im Anschluss fand ein öffentlichkeitswirksamer Projektnachmittag auf Spiekeroog unter Beteiligung von Urlauber:innen und Inselbewohner:innen statt. Die beiden Themen berühren zum einen die Lebenswelt der Spiekerooger Schüler:innen und genügen zum anderen dem Anspruch einer Bildung für nachhaltige Entwicklung, indem insbesondere Fachgrenzenüberschreitender Unterricht realisiert worden ist. Wegen der fachlichen Breite des Unterrichtsvorhabens wurden an gewissen Stellen der Entwicklungsarbeit Expert:innen von der Insel konsultiert, wie bspw. Leiter:innen des Nationalparkhauses Wittbülten, ein Inselführer und eine Fachperson für Abfallwirtschaft auf der Insel.

Die Umsetzung des Unterrichtsprojekts fand im Juni 2016 statt. Masterstudierende und Lehrkräfte der Hermann-Lietz-Schule sowie der Inselfschule unterrichteten gemeinsam, um die beschriebenen Synergien auch während der Umsetzung zu nutzen. Da die Wirksamkeit des entwickelten Materials geprüft werden sollte, hatten einige der Studierenden den Auftrag, die Akteur:innen zu beobachten und Interviews mit den involvierten Personengruppen zu führen. Es wurden die Wirkung des Unterrichtskonzepts und der Materialien mittels Beobachtungsbögen und leitfadengestützter Interviews (Witzel, 1985) untersucht. Weil die Lehrkräfte der Hermann-Lietz-Schule aufgrund des schulischen Leitbildes mit Konzepten der Nachhaltigkeit im Allgemeinen und im Bereich ihrer Fächer eng vertraut sind, ergaben sich durch die Zusammenarbeit mit Studierenden und Projektmitarbeiter:innen für alle Beteiligten neue Perspektiven auf die Umsetzungsmöglichkeiten von BNE im Schulunterricht. Für die Lehrkräfte kamen Planung und Umsetzung des Unterrichtsprojekts einer Fortbildung gleich, in der ihnen neue fachliche und fachdidaktische Zugänge für die Konzeption innovativer Unterrichtsmaterialien eröffnet wurden, die sie in ihrem weiteren Unterricht nutzen können. Die erfahrenen Lehrkräfte konnten ihre Expertise wiederum in die gemeinsame Arbeit durch Unterstützung der Lehramtsstudierenden gewinnbringend einbringen, sodass die Lehramtsstudierenden professionalisiert wurden. Für das Projekt bot sich die Chance, Fachgrenzen-überschreitenden Schulunterricht und Lehrerbildung zu realisieren und damit einen Beitrag zur Bildung für nachhaltige Entwicklung im Kontext des Weltnaturerbes Wattenmeer zu leisten.

2.5.2 Unterrichtsexkursion 2017

Aufgrund der positiven Wirkung der Konstellation der Akteur:innen im Projekt (Lehrkräfte, Schüler:innen, Hochschullehrende, Lehramtsstudierende, Expert:innen der Insel), die bei der Planung und Umsetzung des Unterrichtsprojektes im Jahr 2016 spezifisch mitgewirkt haben, wurde auch im Durchgang 2017 auf diese Synergien gesetzt. Allerdings wurde eine Zweistufigkeit realisiert: Die Planung des Unterrichtskonzepts ist erneut auf Spiekeroog im Mai 2017 durchgeführt worden; die Umsetzung hat dann in Oldenburg mit Schüler:innen von Spiekeroog und aus Oldenburg stattgefunden. Lehrkräfte der Spiekerooger Schulen und zweier Oldenburger Schulen sind beteiligt gewesen, um das Unterrichtskonzept weiter in der Region zu disseminieren. Der prinzipielle Ablauf des Vorhabens ist in folgender Abbildung zu sehen.

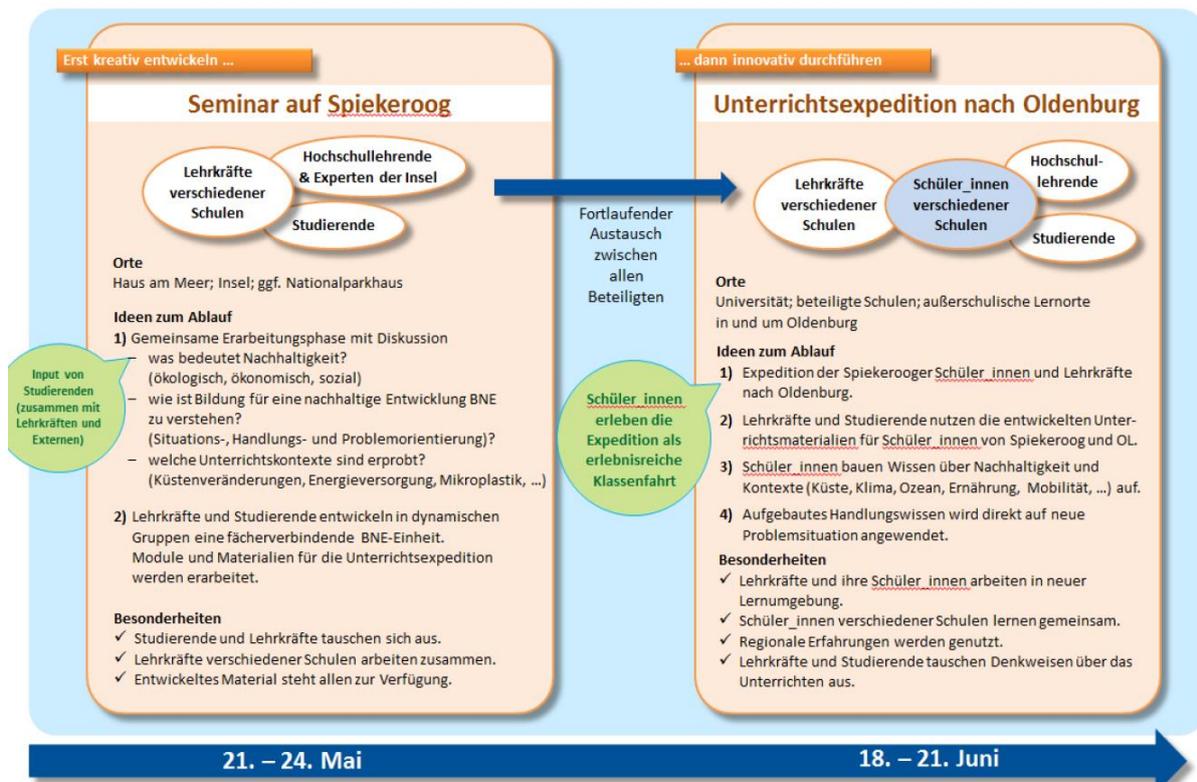


Abb. 38. Planung und Umsetzung des Unterrichtsprojekts im Jahr 2017

Für die Vorbereitung des Projekts haben zahlreiche Planungsgespräche auf Spiekeroog und in Oldenburg stattgefunden. Diese sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tab. 3. Planungsgespräche zur Realisierung des BNE-Unterrichtsprojekts 2017

Datum	Lernort	Inhalt
Okt. 2016	Vier Lehrkräfte der Hermann-Lietz-Schule Spiekeroog und der Inselschule Spiekeroog, Schulleiter	<ul style="list-style-type: none"> ○ Konzeption des BNE-Projekts 2017 ○ Rollenverteilungen ○ Orte ○ Beteiligte Schüler:innen ○ Ersatz von Unterrichtsausfall
Jan. 2017	Schulleitung Graf Anton-Günther-Schule	<ul style="list-style-type: none"> ○ Beteiligung der Schule und zweier Lehrkräfte am BNE-Projekt; Nutzen für die beteiligte Schule
Feb. 2017	Schulleitung Neues Gymnasium Oldenburg	<ul style="list-style-type: none"> ○ Beteiligung der Schule und zweier Lehrkräfte am BNE-Projekt; Nutzen für die beteiligte Schule
März 2017	Vier Lehrkräfte der beteiligten Oldenburger Schulen	<ul style="list-style-type: none"> ○ Konzeption des BNE-Projekts 2017 unter dem Motto „Lifestyle 2030“, Rollenverteilungen, Orte, Beteiligte ○ Schwerpunkte: Mobilität, Ernährung, Kleidung, Medien
März 2017	Vier Lehrkräfte der Hermann-Lietz-Schule Spiekeroog und der Inselschule Spiekeroog, Schulleiter	<ul style="list-style-type: none"> ○ Konzeption des BNE-Projekts 2017 unter dem Motto „Lifestyle 2030“, Rollenverteilungen, Orte, Beteiligte ○ Schwerpunkte: Mobilität, Ernährung, Kleidung, Medien ○ Unterrichtersatz durch Universitätsmitglieder
durchgängig	Planungsgespräche mit allen Beteiligten	<ul style="list-style-type: none"> ○ Detailplanung der Unterrichtsexkursion

Die Umsetzung des Vorhabens an der Universität in Oldenburg ermöglichte weiteren Schulen mit ihren Lehrkräften und Schüler:innen eine Partizipation am Projekt. Durch die Teilnahme des Neuen Gymnasiums Oldenburg (NGO), der Graf-Anton-Günther-Schule (GAG), der Hermann-Lietz-Schule (HLS) und der Inselfschule Spiekeroog sind Schüler:innen und Lehrkräfte aus vier verschiedenen Schulen im Projekt zusammengekommen. Die Zahl der teilnehmenden Studierenden wurde auf 20 festgesetzt. Sie partizipierten innerhalb eines Studienmoduls am Projekt. Die Anzahl der Teilnehmenden sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tab. 4. Zusammensetzung und Anzahl der Mitwirkenden am BNE-Unterrichtsprojekt 2017

Institution	Teilnehmende
Neues Gymnasium Oldenburg	2 Lehrkräfte + 10 Schüler/innen
Graf-Anton-Günther-Schule Oldenburg	2 Lehrkräfte + 10 Schüler_innen
Hermann-Lietz-Schule, Inselfschule Spiekeroog	4 Lehrkräfte + 20 Schüler_innen
Universität Oldenburg	4 Hochschullehrende + 21 Studierende
Summe:	8 Lehrkräfte + 4 Hochschullehrende + 40 Schüler/innen + 21 Studierende = 73 Personen

Bei der Entwicklung der Lernmaterialien auf der Insel Spiekeroog haben die Studierenden, Lehrkräfte und Hochschullehrenden in gemischten Gruppen teilgenommen, um Personen unterschiedlicher Institutionen zusammenzubringen. Folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Ablauf auf Spiekeroog.

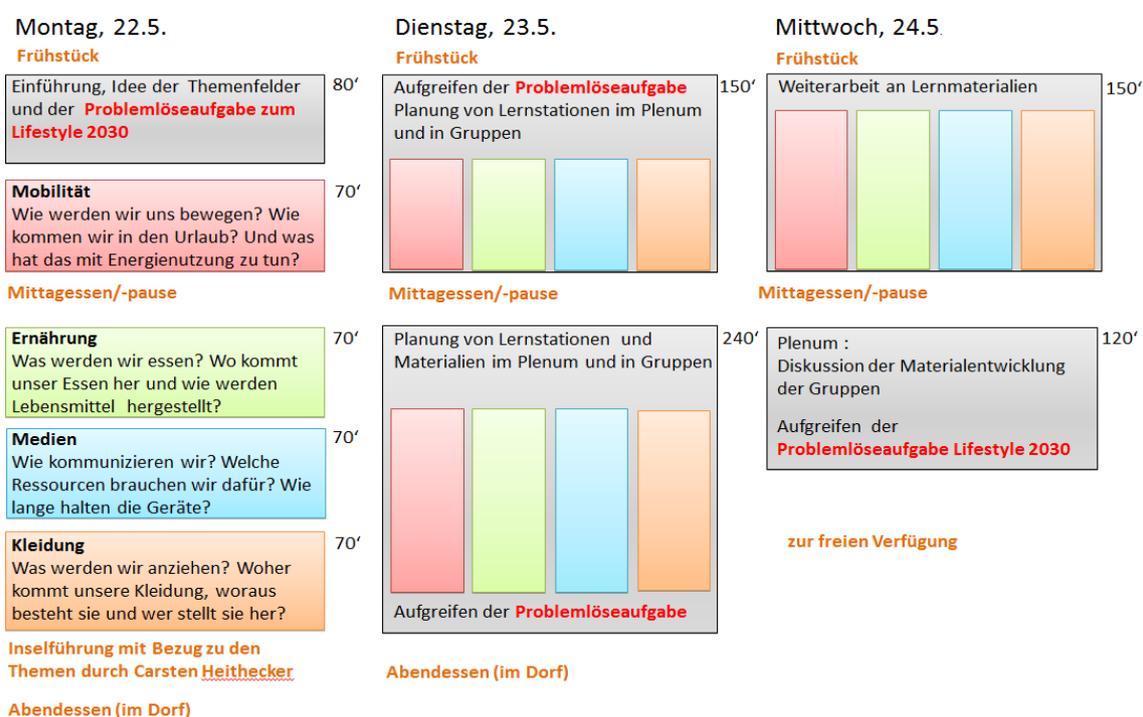


Abb. 39. Zeitplan zum Veranstaltungsteil auf Spiekeroog

Der Veranstaltungsteil, der in Oldenburg stattfand und in dem die Escape-Challenges durchgeführt wurden, hatte folgende zeitliche Struktur:

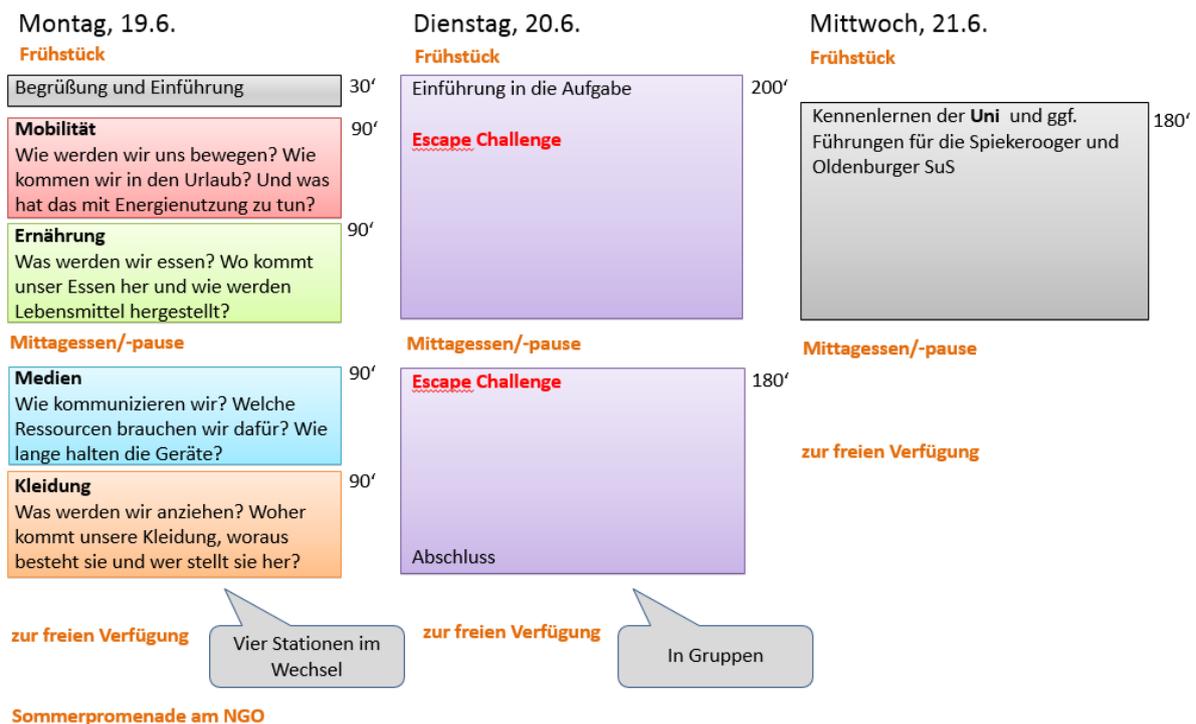


Abb. 40. Zeitplan zum Veranstaltungsteil in Oldenburg

Ein weiterer Studierender hat die Mitwirkenden systematisch per Interview und per Fragebögen befragt (Pohlschneider, 2018). Es konnten die Erwartungen und die Erfahrungen aller Beteiligten erhoben werden. Es zeigte sich u. a., dass alle Beteiligten einen Mehrwert im gegenseitigen Austausch erfahren haben, indem Nachhaltigkeit aus verschiedenen Blickwinkeln auf Schlüsselbereiche wie Mobilität, Kleidung, Ernährung und Medien betrachtet worden ist. Als problematisch wurde erkannt, dass im Unterrichtsprojekt eine große Herausforderung für die Schüler:innen darin bestand, dass sie gelerntes Nachhaltigkeitswissen direkt wieder in Aufgaben anwenden musste, die als "Escape challenges" konzipiert waren. Das konnte jedoch nicht von allen Schülerinnen und Schülern geleistet werden. Erfahrungen hiermit flossen in die Exkursion 2018 ein.

2.5.3 Unterrichtsexkursion 2018

Im Zentrum der dritten Bildungsexkursion stand diesmal das Thema der Nachhaltigkeitsstrategien von Metropolregionen. Dazu sind die Projektleitenden mit zwanzig Studierenden und Lehrkräften der kooperierenden Hermann-Lietz-Schule Spiekeroog in die Metropole Berlin gefahren, um sich über dortige Nachhaltigkeitskonzepte zu informieren und mit Verantwortlichen ins Gespräch zu kommen. Der Reisezeitraum war Juni 2018. Berlin nimmt neben z. B. Kopenhagen eine Vorreiterrolle bei der nachhaltigen Entwicklung ein. Sich über die kommunalen und zivilgesellschaftlichen Ansätze zu informieren und sie eine Nachhaltigkeitsbildung umzusetzen, war das Ziel der Bildungsexkursion. Es stellten sich Fragen wie:

- Wie werden Ziele der nachhaltigen Entwicklung umgesetzt und welche Unterstützungen, aber auch Grenzen zeigen sich dabei auf?

- Wie lassen sich Tendenzen einer wachsenden Metropolregion und Nachhaltigkeitsziele miteinander vereinbaren?
- Welche Visionen für die nachhaltige Metropole gibt es?

Diese Fragestellungen wurden bei der Bildungsexkursion unter aktiver Mitwirkung der Studierenden aus vier Perspektiven beleuchtet (Abb. 41): Die Nachhaltigkeitsperspektiven der Kommune Berlin; die Nachhaltigkeitsaktivitäten von schulischen und außerschulischen Lernorten (hier ging es auch um Nachhaltigkeitsbildung); sowie die wissenschaftliche Perspektive auf nachhaltiges Verhalten (hier wurde das Klimaprojekt KLiB des Potsdam Institut für Klimafolgenforschung besucht).

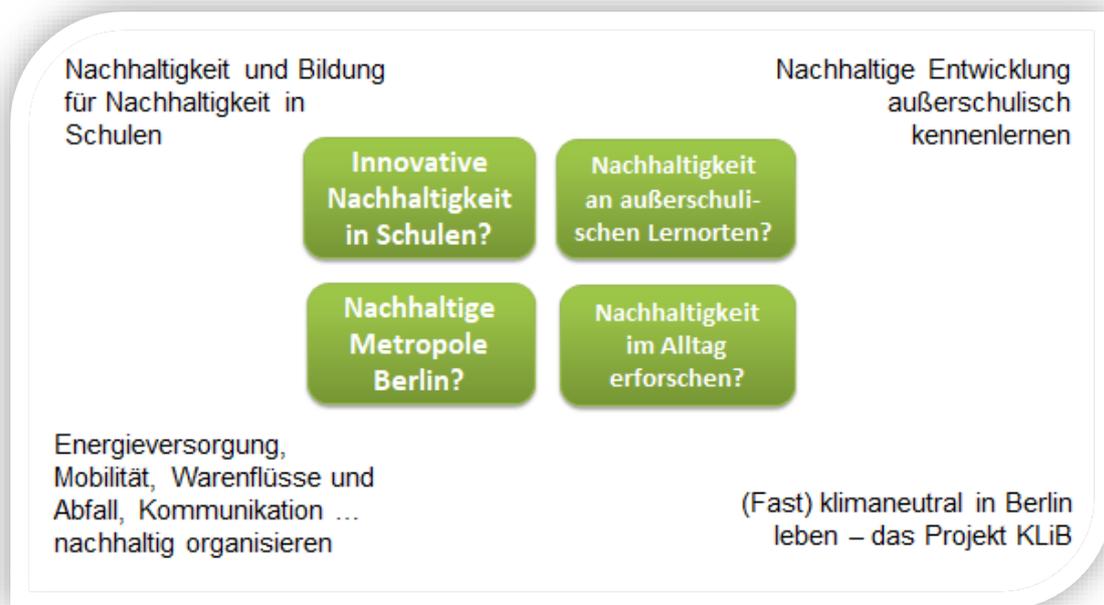


Abb. 41. Perspektiven der Bildungsexkursion 2018

Die Orte wurden durch die Projektleitenden zusammen mit den Studierenden zuvor recherchiert und ausgewählt. Als ausgezeichnete Schule für nachhaltige Entwicklung wurde die Schule Friedensburg-Oberschule mit gymnasialer Oberstufe Berlin besucht; der außerschulische Lernort Freilandlabor Marzahn wurde kennengelernt; das Projekt "Klimaneutral leben in Berlin (KLiB)" vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) stellt die wissenschaftliche Perspektive dar – und da es nicht gelang, Politiker:innen zum Thema Nachhaltigkeit zu erreichen – wurde das urban-gardening-Projekt im Prinzessinnengarten und das "Energieeffizienzhaus Plus mit Elektromobilität" der Forschungsinitiative Zukunft Bau besucht. Die Besuche wurden von den Studierenden vorbereitet und im Plenum dahingehend diskutiert, inwiefern Nachhaltigkeitsziele in diesen Vorhaben erreicht werden und inwiefern sie Gegenstand von Bildungsaktivitäten mit Schüler:innen sein könnten. Insbesondere stand dabei die Frage im Fokus, wie BNE unter Nutzung der gemachten Erfahrungen auch im Fachunterricht, wie insbesondere im Physikunterricht, umgesetzt werden kann. Hierzu bestand die Prüfungsleistung für die Studierenden darin, solche Konzepte auszuarbeiten.

2.5.3.1 Entwicklung einer Unterrichtskonzeption

Zwei der mitgereisten Studierenden, Laura Lietz und Wiebke Menzel, haben im Nachgang der Bildungsexkursion auf Basis der Ausarbeitungen der anderen Studierenden in ihren Masterarbeiten ein

umfangreiches und innovatives Unterrichtskonzept für den Physikunterricht der Sekundarstufe I entwickelt und erprobt (Lietz & Menzel, 2019). Grundidee des Konzepts ist es zu verdeutlichen, welche physikalischen Kompetenzen benötigt werden, um in Nachhaltigkeitsfragen (z. B. zur Versorgung mit Lebensmitteln oder bei der Mobilität) argumentieren zu können. Das Unterrichtskonzept soll Lehrkräften die Möglichkeit bieten, BNE betreiben und diesbezügliche Ziele unter den teilweise engen Bedingungen des Physikunterrichts in der Schule erreichen zu können.

3 Fazit

Das von der DBU geförderte Projekt hat sich als vielgestaltiger erwiesen, als ursprünglich erwartet. Alle anvisierten Ziele sind erreicht worden. Zudem sind im Verlaufe des Projekts neue Zielrichtungen hinzugekommen, denen im Rahmen der Möglichkeiten nachgegangen wurde. So ist der gesamte Bereich der Zusammenarbeit mit Ausstellungsagenturen hinzugekommen, was gezeigt hat, dass im Bereich der Wissenschaftskommunikation weitere Akteur:innen wichtige Rollen spielen, nicht allein die Ausstellungshäuser. Hier hat sich ein insgesamt ein neuer Entwicklungs- und Forschungsbereich für Fachdidaktiken aufgetan, der unbedingt wieder verfolgt werden sollte. Auch war anfangs nicht geplant, innerhalb des Projekts Promotionsprojekte durchzuführen, aber es wurde deutlich, dass bei der Beurteilung von Besucher:innenvorstellungen, bei der fachlichen Klärung sowie der didaktischen Strukturierung grundlegende Teilstudien durchgeführt werden mussten. Die gelang im Rahmen von Promotionen der Projektmitarbeitenden, die teilweise durch eigene Geldmittel des Antragstellers mitfinanziert wurden. Dies war möglich, weil hervorragende Mitarbeitende eingestellt werden konnten, Frau Dr. Annika Roskam und Herr Dr. Kai Bliesmer, die 2020 ihre Promotionsvorhaben mit Auszeichnung abgeschlossen haben. Neben grundlegenden Erkenntnissen zur non-formalen Vermittlung der Physik im Küstenraum ist ein Ausstellungskonzept und eine Broschüre erstellt worden, die Nationalpark-Häuser und weitere non-formale Bildungseinrichtungen nutzen können und auch bereits nutzen. Damit ist die Verstetigung der geförderten Maßnahmen gesichert. Im Nebeneffekt konnte das Netzwerk der Schulen und non-formalen Bildungseinrichtungen im Großraum NordWest Niedersachsens gestärkt und für das Thema des Projekts sensibilisiert werden. Bedarfe der Bildungseinrichtungen zur Unterstützung im Kontext des Projekts gehen beim Antragsteller regelmäßig ein.

An dieser Stelle sei der DBU für ihre großzügige Unterstützung und die inhaltliche Betreuung gedankt, ebenso den Beiratsmitgliedern Prof. Dr. Peter Heering, Dr. Peter Lienau und Peter Südbeck.

4 Verzeichnisse

Das Verzeichnis gliedert sich in zwei Bereiche. Im ersten sind alle Publikationen aufgeführt, die im Zuge der Projekt-Arbeiten entstanden und von den Projektleitenden verantwortet werden. Im zweiten Bereich sind alle übrigen Literaturquellen aufgeführt, die von den Projektleitenden herangezogen wurden, um die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu vollführen.

4.1 Projektbezogenes Literaturverzeichnis

4.1.1 Abschlussarbeiten

- Auerbach, B. (2019). *Empirische Untersuchung zu Vorwissen und Denkweisen von Besuchenden einer Ausstellung zu Strömungen*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Auerbach, B. (2021). *Lernendenvorstellungen von Ebbe und Flut*. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Berghegger, L. (2019). *Literaturbasierte Analyse der fachlichen Kerne von wirbelhaften Strömungs- und Strukturbildungsphänomenen*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Berghegger, L. (2021). *Entwicklung und empirische Untersuchung einer Schautafel zum Thema Gezeiten*. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Bergmann, M. (2018). *Empiriebasierte Entwicklung von Vernetzungselementen in einer Ausstellung zu Strömungsphänomenen im Küstenbereich*. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Beus, L. (2017). *Befragung von Lehrkräften zu Ausstellungen zum Themenfeld Wattenmeer, Küste und Ozean*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Bienert, J. & Jaskulska, N. (2020). *Entwicklung und empirische Erprobung einer Experimentierstation zur Orientierung von Zugvögeln am Erdmagnetfeld*. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Bliesmer, K. (2016). *Fachdidaktische Analyse von Bildungsangeboten norddeutscher Meeresforschungsinstitute*. Masterarbeit. Universität Oldenburg.
- Brand, M. (2019). *Empirische Untersuchungen zur Interaktion mit Strömungsexponaten*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Büchter, N. & Przibilla, A. (2017). *Entwicklung und Erprobung von Exponaten zu den Themen Gezeitenwelle, Golfstrom und Tsunami*. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Dulle, M. (2018). *Empiriebasierte Weiterentwicklung von Ausstellungsexponaten zu Strömungsphänomenen im Küstenbereich*. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Eberlei, B. (2017). *Fachdidaktische Weiterentwicklung von Exponaten zu Strömungsphänomenen mit granularer Materie und deren Evaluation*. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Fredeweß, R. (2019). *Gestaltung und Erprobung der Unterrichtseinbettung einer Ausstellungsrallye im Nationalpark-Haus Wangerland*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Heuer, S. (2017). *Fachdidaktische Entwicklung eines Exponates zum Phänomen der Dünenentstehung*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Lietz, L. & Menzel, W. (2019). *Ein BNE-orientiertes Unterrichtskonzept für den Physikunterricht*. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Mehrle, N. (2017). *Fachdidaktische Konzeption einer Ausstellung zum Thema Energie im und am Meer*. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Optazi, M. (2019). *Physikalische Wattwanderung – Konzeption einer didaktischen Strukturierung von der Dynamik der unbelebten Natur in Küstenregionen*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Piplak, K. & Ostendorf, R. (2018). *Fachliche und fachdidaktische Analyse von ausgewählten Exponaten mit physikalischem Bezug in Nationalparkhäusern des Nationalparks Wattenmeer*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Pohlschneider, S. (2018). *Prozessbegleitung eines Projekts zur Bildung für eine nachhaltige Entwicklung in der Lehrerbildung*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.

- Rosenau, H. (2019). *Physikalische Wattwanderung – Evaluation einer didaktischen Strukturierung*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Roskam, A. (2016). *Fachdidaktische Analyse außerschulischer Repräsentationen der (geo-) physikalischen Dynamik im Wattenmeer und an der Küste*. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Ruland, C. (2019). *Vorstellungen und Begriffsbildungen von Strömungs- und Strukturbildungsphänomenen – Eine empirische Studie mit Erwachsenen*. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Schoemaker, J. (2019). *Vorstellungen und Begriffsbildungen von Strömungs- und Strukturbildungsphänomenen – Eine empirische Studie mit Senioren*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Staebner, M. (2020). *Rotation und Revolution von Erde und Mond in einem Modell für außerschulische Lernorte – Theoretische Überlegungen und technische Realisation*. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Stegemann, D. & Wortmann, M. (2018). *Fachdidaktische Entwicklung und Evaluation eines Exponates zum Phänomen der Priellentstehung*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität.
- Tischer, J. (2018). *Empirische Untersuchung der Verbindung zwischen der kognitiven Ebene und der Handlungsebene in einer Ausstellung zu Strömungsphänomenen*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Viskupaitis, M. (2018). „Ursache-Strömung-Wirkung“ – Einbettung eines außerschulischen Lernortes in den Schulunterricht - Fokus: Konzeption eines Lernheftes. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Wilken, J. (2019). *Vorstellungen und Begriffsbildungen von Strömungs- und Strukturbildungsphänomenen – Eine empirische Studie mit Jugendlichen*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Witte, B. (2019). *Literaturbasierte Analyse der fachlichen Kerne von globalen Strömungs- und Strukturbildungsphänomenen*. Bachelorarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.

4.1.2 Vorträge und Poster

- Bliesmer, K., Roskam, A. & Komorek, M. (2017). *Elementarisierungen zu küstennahen Strukturbildungen und Strömungen*. Jahrestagung der Gesellschaft für die Didaktik der Chemie und Physik GDCP (Vortrag). Universität Regensburg.
- Bliesmer, K., Komorek, M. (2018a). *Strömungsmuster für Ausstellungen didaktisch rekonstruieren*. Jahrestagung der Gesellschaft für die Didaktik der Chemie und Physik GDCP (Vortrag). Universität Kiel.
- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2018b). *Elementarisierungen zu Strömungen und Strukturbildungen*. Beitrag zur DPG-Frühjahrstagung (Vortrag). Universität Würzburg.
- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2019a). *Educational Reconstruction of Currents and Structure Formations*. Tagung der European Science Education Research Association ESERA (Poster). Universität Bologna.
- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2019b). *Physikalische Dynamik an der Küste didaktisch rekonstruieren*. Jahrestagung der Gesellschaft für die Didaktik der Chemie und Physik GDCP (Vortrag). Universität Wien.
- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2020a). *Didaktische Leitlinien für Ausstellungen zu Strukturphänomenen*. Tagung des Promotionsprogramms GINT – Lernen in informellen Räumen (Vortrag). Universität Oldenburg.
- Bliesmer, K., Roskam, A. & Komorek, M. (2020). *Physikalische Dynamik der Küste an außerschulischen Lernorten*. Jahrestagung der Gesellschaft für die Didaktik der Chemie und Physik GDCP (Vortrag). Online.
- Roskam, A., Bliesmer, K. & Komorek, M. (2017). *Phänomenologisches und analoges Lernen in Nationalparkhäusern*. Jahrestagung der Gesellschaft für die Didaktik der Chemie und Physik GDCP (Vortrag). Universität Regensburg.

- Roskam, A. & Komorek, M. (2018a). *Lernprozessanalyse im Nationalparkhaus*. Jahrestagung der Gesellschaft für die Didaktik der Chemie und Physik GDCP (Vortrag). Universität Kiel.
- Roskam, A. & Komorek, M. (2018b). Lernprozessanalyse zu Strömungsexperimenten im Nationalparkhaus. Tagung des Promotionsprogramms GINT – Lernen in informellen Räumen (Vortrag). Universität Oldenburg.
- Roskam, A., Bliesmer, K. & Komorek, M. (2019). *Climate Change and the Physical Dynamics of Coast, Wadden Sea and Ocean as topics for Extracurricular Learning*. Tagung der European Science Education Research Association ESERA (Poster). Universität Bologna.

4.1.3 Publikationen mit Projektbezug

- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2018c). Elementarisierungen zu Strömungen und Strukturbildungen. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Online verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/875> [Zugriff: 26.2.2021].
- Bliesmer, K., Roskam, A. & Komorek, M. (2018). Elementarisierungen zu küstennahen Strukturbildungen und Strömungen. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualitätvoller Chemie- und Physikunterricht - normative und empirische Dimensionen* (Tagungsband der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Bd. 38) (S. 304-307). Regensburg: GDCP. Online verfügbar unter: https://gdcp-ev.de/wp-content/tb2018/TB2018_304_Bliesmer.pdf [Zugriff: 26.2.2021].
- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2019c). Strömungsmuster für Ausstellungen didaktisch rekonstruieren. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe* (Tagungsband der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Bd. 39) (S. 177-180). Regensburg: GDCP. Online verfügbar unter: http://www.gdcp.de/images/tb2019/TB2019_177_Bliesmer.pdf [Zugriff: 26.2.2021].
- Bliesmer, K. (2020). *Physik der Küste für außerschulische Lernorte – Eine Didaktische Rekonstruktion* (Studien zum Physik- und Chemielernen, Bd. 306). Berlin: Logos.
- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2020b). Educational Reconstruction of Currents and Structure Formations. In O. Levrini & G. Tasquier (Eds.), *Electronic Proceedings of the ESERA 2019 Conference. The beauty and pleasure of understanding: engaging with contemporary challenges through science education, Part 1* (co-ed. A. De Ambrosis & O. Finlayson), pp. 40-49. Bologna: Alma Mater Studiorum – University of Bologna. Online verfügbar unter: <https://www.dropbox.com/s/v3rzoxz7ypxesc8/Strand%2001.pdf?dl=0> [Zugriff: 26.2.2021].
- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2020c). Physikalische Dynamik an der Küste didaktisch rekonstruieren. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen* (Tagungsband der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Bd. 40) (S. 475-478). Essen: GDCP. Online verfügbar unter: https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_475_Bliesmer.pdf [Zugriff: 26.2.2021].
- Bliesmer, K., Roskam, A. & Komorek, M. (2021). Physikalische Dynamik der Küste an außerschulischen Lernorten. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch?* (Tagungsband der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Bd. 41) (S. 165-168). Essen: GDCP. Online verfügbar unter: https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2021/TB2021_165_Bliesmer.pdf [Zugriff: 27.3.21].
- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2021a). Physikalische Dynamik der Küste für außerschulische Lernorte didaktisch rekonstruieren. In S. Dannemann, J. Heeg & Y. von Roux (Hrsg.), *Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Rahmen und Impulsgeber für die Entwicklung von Fachdidaktik und Unterricht; HLT – Herausforderung Lehrer*innenbildung – Zeitschrift zur Konzeption, Gestaltung und Diskussion*, 4(2), S. 51-66. Online verfügbar unter <https://www.herausforderung-lehrerinnenbildung.de/index.php/hlz/article/view/2579/4143> [Zugriff: 26.2.2021].
- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2021b). Didaktische Rekonstruktion zur Weiterentwicklung von außerschulischen Lernorten an der Küste. In C. Maurer, K. Rincke & M. Hemmer (Hrsg.), *Fachliche Bildung und digitale Transformation. Fachdidaktische Forschung und Diskurse* (Fachtagung der Gesellschaft für Fachdidaktik 2020), S. 161-164. Regensburg: Universität Regensburg.

- Online unter: https://www.pedocs.de/volltexte/2021/21659/pdf/Maurer_Rincke_Hemmer_2021_Fachliche_Bildung.pdf [Zugriff: 9.3.2021].
- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2021c). Didaktische Leitlinien für Ausstellungen zu Strukturphänomenen. In L. Beyer, C. Gorr, C. Kather, M. Komorek, P. Röben & S. Selle (Hrsg.), *Orte und Prozesse außerschulischen Lernens erforschen und weiterentwickeln* (Außerschulische Lernorte – Beiträge zur Didaktik, Bd. 6.), S. 49-58. Münster Lit.
- Roskam, A., Bliesmer, K. & Komorek, M. (2018a). Phänomenologisches und analoges lernen in Nationalparkhäusern. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht - normative und empirische Dimensionen* (Tagungsband der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Bd. 38)(S. 636-639). Regensburg: Universität Regensburg. Online verfügbar unter: https://gdc-ev.de/wp-content/tb2018/TB2018_636_Roskam.pdf [Zugriff: 26.2.2021].
- Roskam, A., Bliesmer, K. & Komorek, M. (2018b). Lernen in Ausstellungen am Beispiel der Nationalparkhäuser am Wattenmeer – Didaktische Rekonstruktionen und empirische Untersuchungen. In P. Gautschi, A. Rempfler, B. Sommer Häller & M. Wilhelm (Hrsg.), *Aneignungspraktiken an außerschulischen Lernorten* (Außerschulische Lernorte – Beiträge zur Didaktik, Bd. 5), S. 249-258. Münster: LIT.
- Roskam, A. & Komorek, M. (2019). *Lernprozessanalyse im Nationalparkhaus*. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe* (Tagungsband der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Bd. 39) (S. 392-395). Regensburg: GDCP. Online verfügbar unter: https://www.gdc-ev.de/wp-content/tagungsbaende/GDCP_Band39.pdf [Zugriff; 21.09.2021].
- Roskam, A. (2020). *Kognitive Verarbeitungsprozesse in der Interaktion mit Strömungsexperimenten in einer Ausstellung. Eine empirische Untersuchung mit Besuchenden an außerschulischen Lernorten im Küstenraum*. Wiesbaden: Springer Spektrum.
- Roskam, A., Bliesmer, K. & Komorek, M. (2020). Climate Change and the Physical Dynamics of Coast, Wadden Sea and Ocean as Topics for Extracurricular Learning. In O. Levrini & G. Tasquier (Eds.), *Electronic Proceedings of the ESERA 2019 Conference. The beauty and pleasure of understanding: engaging with contemporary challenges through science education, Part 8* (co-ed. A. Laherto & E. Rybska) (pp. 883-888). Bologna: Alma Mater Studiorum – University of Bologna. Online verfügbar unter: <https://www.dropbox.com/s/dlgldaxq2grlju7/Strand%2008.pdf?dl=0> [Zugriff: 26.2.2021].
- Roskam, A. & Komorek, M. (2020). Lernprozessanalyse zu Strömungsexperimenten im Nationalparkhaus. In L. Beyer, C. Gorr, C. Kather, M. Komorek, P. Röben & S. Selle (Hrsg.): *Orte und Prozesse außerschulischen Lernens erforschen und weiterentwickeln*. Münster: Lit.
- Striligka, A., Bliesmer, K., Sajons, C. & Komorek, M. (eingereicht). Adaptation of constructivist learning and teaching models for non-formal science education research. In P. Patrick (Ed.). *Applying Learning Theories in Research Outside the Classroom*. New York: Springer.

4.2 Generelles Literaturverzeichnis

- Anderson, R. S. (1990). Eolian ripples as examples of self-organization in geomorphological systems. *Earth-Science Reviews*, 29 (1-4), 77-96.
- Ausubel, D. P. (1960). The Use of Advance Organizers in the Learning and Retention of Meaningful Verbal Material. *Journal of Educational Psychology*, 51 (5), 267-272.
- Bar-Yam, Y. (1997). *Dynamics of Complex Systems (= Studies in Nonlinearity)*. Boulder, CO: Westview Press.
- Bleichroth, W. (1991). Elementarisierung, das Kernstück der Unterrichtsvorbereitung. *Naturwissenschaft im Unterricht. Physik*, 2 (6), 4-11.
- Blundell, S. J. & Blundell, K. M. (2010). *Concepts in Thermal Physics*. Oxford: Oxford University Press.
- Bogner, A., Littich, B. & Menz, W. (2005). *Das Experteninterview. Theorie, Methode, Anwendung*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

- Bröking, K. (2006). *Warum fließen Flüsse nicht geradeaus bergab? Teil 2*. Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation. Online verfügbar unter: <https://www.ds.mpg.de/212128/20> [Zugriff: 02.09.2019].
- DeAngelis, D., Post, W. M. & Travis, C. C. (1986). *Positive Feedback in Natural Systems*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer.
- Demirel, Y. (2014). *Nonequilibrium Thermodynamics. Transport and Rate Processes in Physical, Chemical and Biological Systems*. Amsterdam, Oxford: Elsevier.
- Design-Based Research Collective (2003). Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry. *Educational Researcher*, 32 (1), 5-8.
- 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.
- 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, Boston, Taipei: Sense Publishers.
- Ebeling, W., Freund, J. & Schweitzer, F. (1998). *Komplexe Strukturen, Entropie und Information*. Stuttgart: Teubner.
- Edelmann, W. & Wittmann, S. (2012). *Lernpsychologie*. Weinheim: Beltz.
- 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.
- Grotzinger, J. & Jordan, T. (2017). *Press/Siever Allgemeine Geologie*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Herrmann, H. J. (2005). Spuren im Sand. Die Physik der Dünen. *Physik Journal*, 61 (8), 57-60.
- Ikeda, M. & Apel, J. R. (1981). Mesoscale Eddies Detached from Spatially Growing Meanders in an Eastward-Flowing Oceanic jet Using a Two-Layer Quasi-Geostrophic Model. *Journal of Physical Oceanography*, 11 (12), 1638–1661.
- Jones, L. S. & Schumm, S. A. (1999). Causes of Avulsion: An Overview. In N. D. Smith & J. Rogers (Hrsg.), *Fluvial Sedimentology VI* (S. 169-178). Oxford u. a.: Blackwell Science.
- 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.
- Kuckartz, U. (2018). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Weinheim, Basel: Beltz Juventa.
- Labudde, P. (2010). *Fachdidaktik Naturwissenschaft. 1.-9. Schuljahr*. Bern: Haupt UTB.
- Liew, C.-W. & Treagust, D. F. (1998). *The Effectiveness of Predict-Observe-Explain Tasks in Diagnosing Students' Understanding of Science and in Identifying Their Levels of Achievement*. Meeting of the American Educational Research Association, San Diego, CA: 13.-17. April 1998. Online verfügbar unter: <https://fi-les.eric.ed.gov/fulltext/ED420715.pdf> [Zugriff: 11.06.2018].
- Luo, Z., Zhou, X & Gao, S. (2006). Two possible mechanisms for vortex self-organization. *Science in China. Series D. Earth Sciences*, 49 (2), 202-211.
- Mainzer, K. (1999). *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Malcherek, A. (2010). *Gezeiten und Wellen. Die Hydromechanik der Küstengewässer*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Maribus (2017). *Die Küsten – ein wertvoller Lebensraum unter Druck (= World Ocean Review, Bd. 5)*. Online verfügbar unter: https://worldoceanreview.com/wp-content/downloads/wor5/WOR5_de.pdf [Zugriff: 13.07.2018].
- Michelsen G. & Fischer, D. (2016). Bildung für nachhaltige Entwicklung. In K. Ott, J. Dierks & L. Voget-Kleschin (Hrsg.), *Handbuch Umweltethik* (S. 330-334). Stuttgart: J. B. Metzler.
- Ojakangas, G. W. & Stevenson, D. J. (1986). Episodic volcanism of tidally heated satellites with application to Io. *Icarus*, 66 (2), 341-358.

- Ooyama, K. V. (1982). Conceptual Evolution of the Theory and Modeling of the Tropical Cyclone. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 60 (1), 369-380.
- Peale, S. J., Cassen, P. & Reynolds, R. T. (1979). Melting of Io by Tidal Dissipation. *Science*, 203 (4383), 892-894.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W. & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change, *Science Education*, 66 (2), 211-227.
- Raami, A. (2019). Towards Solving the Impossible Problems. In J. W. Cook (Hrsg.), *Sustainability, Human Well-Being, and the Future of Education* (S. 201-233). Cham: Palgrave Macmillan. Online verfügbar unter: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-78580-6_6.pdf [Zugriff: 01.09.2021].
- Schecker, H., Wilhelm, T. Hopf, M. & Duit, R. (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Berlin: Springer Spektrum.
- Schurz, J. (2006). *Systemdenken in der Naturwissenschaft. Von der Thermodynamik zur Allgemeinen Systemtheorie*. Heidelberg: Carl-Auer-Verlag.
- Smyth, W. D. & Moum, J. N. (2012). Ocean Mixing by Kelvin-Helmholtz Instability. *Oceanography*, 25 (2), 140-149.
- Stølum, H. H. (1996). River Meandering as a Self-Organization Process. *Science*, 271 (5256), 1710-1713.
- Titz, S. & Wagner, H.-F. (2007). *Die Kräfte der Gezeiten*. Online verfügbar unter: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/atmosphaere/meere/gezeiten/> [Zugriff: 21.09.2021].
- The Open University (2000). *Waves, Tides and Shallow Water Processes*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. Online verfügbar unter: http://www.sisal.unam.mx/labeco/LAB_ECOLOGIA/OF_files/Waves,%20Tides%20and%20Shallow-Water%20Processes%20%282nd%20Edition%29.pdf [Zugriff: 21.09.2021].
- United Nations General Assembly (2003). *Resolution adopted by the General Assembly. United Nations Decade of Education for Sustainable Development (= A/RES/57/254)*. Online verfügbar unter: <http://www.un-documents.net/a57r254.htm> [Zugriff: 20.08.2018].
- White, R. & Gunstone, R. (1992). *Probing Understanding*. London: Routledge.
- Wilde, K. (1978). *Wärme- und Stoffübergang in Strömungen*. Darmstadt: Steinkopff.
- Witzel, A. (1985). Das problemzentrierte Interview. In G. Jüttemann (Hrsg.), *Qualitative Forschung in der Psychologie* (S. 227-255). Weinheim: Beltz.

4.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1. Projektschwerpunkte und resultierende Arbeitspakete als Organigramm	3
Abb. 2. Forschungsfragen und Ergebnisse der Befragungsstudie von Roskam (2016)	5
Abb. 3. Forschungsfragen und Ergebnisse der Befragungsstudie von Bliesmer (2016)	5
Abb. 4. Model of Educational Reconstruction	8
Abb. 5. Übersicht über Strömungs- und Strukturbildungsphänomene	9
Abb. 6. Versuch zur Erzeugung einer Strömung und einer Sandstruktur	11
Abb. 7. Vorstellungsforschung im Bereich Strömungen und Strukturbildungen	12
Abb. 8. Einladung zum Fachtag "Physik der Küste, des Wattenmeeres und des Ozeans"	16
Abb. 9. Wechselwirkung der Gezeitenströmung in der Nordsee; Bildung von Amphidromien	19
Abb. 10. Verlauf der Gravitationskraft in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Erde und Mond	19
Abb. 11. Richtung der Gravitationskraft in zwei verschiedenen Bezugssystemen	20
Abb. 12. Bewegung der Erde um eine geneigte Achse alle 24 h (Rotation)	20
Abb. 13. Bewegung der Erde und des Mondes um ihr Baryzentrum (Revolution)	21
Abb. 14. Gleichheit (Kurvenschnitt) von Fliehkraft und Gravitationskraft im Baryzentrum	21
Abb. 15. Entstehung von Spring- und Nipptide anhand der Stellung von Sonne und Mond	22
Abb. 16. Analogie zur Illustration der Verformung von Körpern im inhomogenen Gravitationsfeld ...	26
Abb. 17. Einladung zum Fachtag "Ebbe und Flut"	31

Abb. 18. Erster Entwurf einer Gezeiten-Schautafel	33
Abb. 19. Schematische Darstellung zum Design-Based-Research-Zyklus zur Entwicklung	34
Abb. 20. Zusammenfassende Darstellung zum erarbeiteten Ausstellungskonzept	35
Abb. 21. Didaktische Strukturierung zur Prototyp-Ausstellung "Ursache – Strömung – Wirkung"	36
Abb. 22. Drei Exponat-Prototypen der ersten Ausstellungsversion in der Universität Oldenburg	36
Abb. 23. Zwei Exponat-Prototypen der ersten Ausstellungsversion in der Universität Oldenburg	37
Abb. 24. Schüler:innen erproben die Exponate und das zugehörige Lernmaterial	37
Abb. 25. Schüler:innen geben schriftliches Feedback zu den Exponaten und Lernmaterialien	38
Abb. 26. Rahmung der Ausstellung "Ursache-Strömung-Wirkung"	38
Abb. 27. Bewerbung des Tags der Offenen Tür der Strömungsexperimente in Dangast	39
Abb. 28. Einladung: Tag der Offenen Tür der Strömungsexperimente in Dangast	40
Abb. 29. Interview der Projektmitarbeiter:innen am Tag der Offenen Tür in Dangast.....	41
Abb. 30. Lernstation zum Unterschied von winderzeugten Wellen und Tsunamis	43
Abb. 31. Lernstation zur Entstehung von Rippelmustern	43
Abb. 32. Lernstation und Lernmaterial zur Entstehung von Dünen	44
Abb. 33. Verzweigte Prielstrukturen im Sandbecken	45
Abb. 34. Station zur Erzeugung von Prielen	45
Abb. 35. Zahnradmodell, das die Erde-Mond-Bewegung um das Baryzentrum simuliert	47
Abb. 36. Zahnradkonstruktion zur Realisierung des nötigen Übersetzungsverhältnisses im Detail	48
Abb. 37. Übersicht über die Lern- und Experimentierstation zur Orientierung von Zugvögeln.....	49
Abb. 38. Planung und Umsetzung des Unterrichtsprojekts im Jahr 2017	54
Abb. 39. Zeitplan zum Veranstaltungsteil auf Spiekeroog	55
Abb. 40. Zeitplan zum Veranstaltungsteil in Oldenburg	56
Abb. 41. Perspektiven der Bildungsexkursion 2018	57

4.4 Tabellenverzeichnis

Tab. 1. Kooperationsgespräche im Schwerpunkt A mit Datum, Adressat und Inhalt	6
Tab. 2. Übersicht über molekulare und konvektive Transportprozesse	10
Tab. 3. Planungsgespräche zur Realisierung des BNE-Unterrichtsprojekts 2017.....	54
Tab. 4. Zusammensetzung und Anzahl der Mitwirkenden am BNE-Unterrichtsprojekt 2017	55

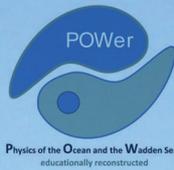
5 Anhang (Broschüre)

Ein beispielhafter Auszug der Broschüre zur Physik der Küste, des Ozeans und des Wattenmeeres ist auf den nachfolgenden Seiten zu finden.

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt



Physics of the Ocean and the Wadden Sea
educationally reconstructed



AG Didaktik der Physik und
Wissenschaftskommunikation

Physik der Küste, des Wattenmeeres und des Ozeans



Handreichung zur Integration
der physikalischen Perspektive
in Ausstellungen
von Nationalpark-Häusern und
anderen Bildungseinrichtungen an der Küste

AG Physikdidaktik und Wissenschaftskommunikation
Universität Oldenburg

Vorwort

Diese Broschüre richtet sich an die Ausstellungsverantwortlichen von Bildungseinrichtungen an der Nordsee. Sie soll eine Hilfe dabei sein, die physikalische Perspektive auf die Dynamik im Küstenraum in Nationalpark-Häusern, Regionalen Umweltbildungseinrichtungen und weiteren Bildungszentren stärker als bisher zu integrieren.

Der Bedarf dazu besteht sowohl bei den Bildungseinrichtungen als auch bei Lehrkräften der Region. Die Broschüre zeigt diese Bedarfe genau auf.

Ein wesentlicher Teil der Broschüre berichtet von einer Ausstellung zu Strömungen, die in zwei National-

park-Häusern erprobt und empirisch begleitet wurde (Abschnitt „im Praxisfeld“).

Ein weiterer Bereich der Broschüre befasst sich mit der fachlichen Klärung von Strömungen und Strukturen, so dass elementare Prinzipien benannt werden (Abschnitt „Physik im Kontext“).

Aus beiden Abschnitten werden im Fazit Leitlinien für die Gestaltung von Exponaten, Lernstationen und ganzen Ausstellungen abgeleitet, die Ausstellungsmachern praktische und theoretisch fundierte Hilfen an die Hand geben.



Das Ausstellungskonzept Ursache – Strömung – Wirkung: Exponate und Erfahrungsberichte aus zwei Nationalpark-Häusern

Das Wattenmeer ist 2009 zum Weltnaturerbe ernannt worden, wodurch seine vielfältige Dynamik in den Fokus gerückt ist. Die biologische Dynamik ist in den Ausstellungshäusern an vielen Beispielen und natürliche Phänomene umfassend dargestellt, die physikalische Dynamik dagegen kaum. Im Projekt ist daher eine Ausstellung zu Strömungsphänomenen geschaffen worden, die den physikalischen Blick auf zahlreiche Strömungsphänomene richtet.

Idee des Ausstellungskonzept

Wir wollen mit Exponaten nicht nur das unübliche Thema der Strömungen darstellen, sondern auch eine starke Interaktion der Besuchenden mit den Exponaten erreichen (Abbildung 1: Didaktischer Rahmen für interaktive Exponate).

Die Exponate sollen manipulierbar sein, damit die Besuchenden vieles daran selbst ausprobieren können. Das Exponat ist ein „Phänomen-Lieferant“. Das Phä-

nomen ist gut beobachtbar und auch Veränderungen, die die Besuchenden am Exponat vornehmen, sind in ihrer Wirkung deutlich zu erkennen. Jedes Exponat ist Teil einer Lernstation, zu der auch schriftliche und multi-mediale Anregungen gehören. Exponat und multimediales Material bilden eine Lernaufgabe (vgl. Abb. 1), die Vorwissen und Vorerfahrung der Besuchenden aktiviert. Als weiterer Bestandteil der Lernstation stellt sich den Besuchenden die Aufgabe, die am Exponat gemachten Erfahrungen auf ein reales System zu übertragen, z.B. auf Ebbe und Flut an der Nordsee. Die Besucher sollen ein mentales Modell von Ebbe und Flut bilden, sie sollen Beziehungen zwischen dem Exponat und dem realen System herstellen. Die Besuchenden beantworten Fragen wie Welche Gemeinsamkeiten und welche Unterschiede bestehen zwischen dem Exponat und dem realen geophysikalischen System? Welche realen Prozesse entsprechen solchen beim Exponat?

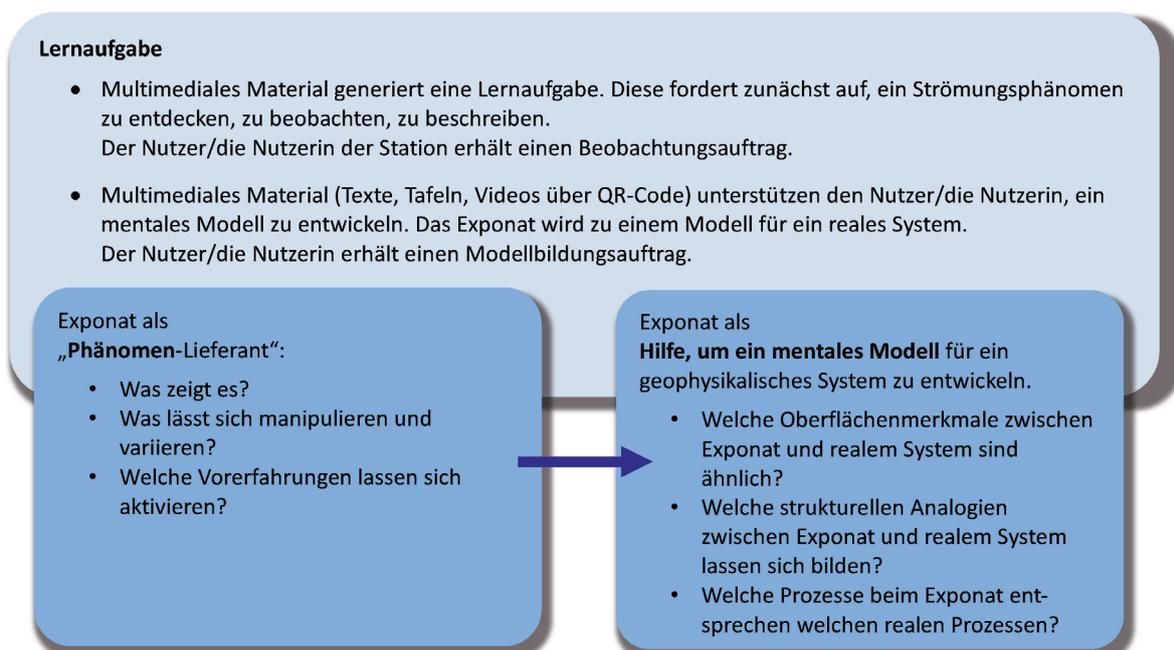


Abbildung 1: Didaktischer Rahmen für interaktive Exponate

Die verschiedenen Lernstationen beziehen sich auf die Bildung von Sandrippel für die Strukturen im Watt; auf die Erzeugung einer zirkulierenden Strömung für den Golfstrom;

auf eine „Solitonwelle“ mit Bezug zu einem Tsunami; einer Kreiswelle für die umlaufende Gezeitenwelle in der Nordsee; und einem Sandgebläse für die Dünenbildung.

Zwischen den Lernstationen und Exponaten können die Besucher Bezüge herstellen. Sie können erkennen, dass eine Strömung die Ursache für ein Phänomen sein kann. Gleichzeitig gibt es auch Ursachen für die

Strömung. Daraus folgt das Motto der Ausstellung „Ursachen - Strömung - Wirkung“. Es deutet das hinter der Ausstellung liegende Prinzip an, dass jede Strömung Ursache und Wirkung zugleich sein kann.



Abbildung 2: Konzept der Ausstellung „Ursache-Strömung-Wirkung“

Gang durch die Ausstellung

Sechs Stationen bilden zusammen die Ausstellung. Ein Flyer hilft den Besuchenden, die verschiedenen Exponate miteinander zu verbinden und den Bezug zum Motto Ursache - Strömung - Wirkung herzustellen. Die „Vernetzungsspinne“ Thekla führt durch die Ausstellung. Jedes Exponat umfasst ein Poster, das hinter dem Exponat hängt und zu bestimmten Handlungen auffordert und anregt, über ablaufende physikalische Prozesse nachzudenken. Außerdem gibt es einen Aufsteller mit weiterführenden Informationen und fachlichen Erklärungen. Thekla stellt Fragen, die durch Aufklappen von Sprechblasen beantwortet werden können. Dadurch wird der Besuchende einbezogen, sich mit den verschiedenen Exponaten der

Stationen auf einer übergeordneten Ebene auseinanderzusetzen. Eine der Stationen dreht sich um ein Exponat (Abb. 3, mit dem eine umlaufende Wasserzirkulation erzeugt werden kann und das als analog zum geophysikalischen System Golfstrom verstanden werden kann. Eingeträufelte Tinte erlaubt es, die Strömung von Wasser sichtbar zu machen und sie zu verfolgen.



Abbildung 3: Exponat zur Erzeugung einer zirkulären Strömung

5. ... nur ein, zwei Tropfen

Schritt 1

Prüfe die Farbe des Wassers. Wenn es zu blau ist, dann muss das Wasser ausgetauscht werden.



Falls das Wasser also zu blau ist, mache folgendes: Schalte als erstes die Steckdose aus! Dann öffne den Hahn und lasse das Wasser bis zur MIN-Markierung abfließen. Fülle nun sauberes Wasser in den Behälter bis zur MAX-Markierung.

Schritt 2

Schaltete die Steckdose ein. Wartet ca. 10 Sekunden.

Nehmt ein bisschen Tinte mit der Pipette auf (bis zur MAX-Markierung).

Gebt einen Tropfen Tinte mit der Pipette bei Klebepunkt Nr. 1 und Nr. 2 in das Wasser.



Anregung

Beobachte, wie sich die Tinte im Wasser verhält.

Beschreibe, was du beobachten kannst.

Schritt 3



Messe mit dem bereitliegenden Infrarotthermometer die Temperatur des Wassers von oben, wo Klebepunkte aufgebracht sind.

Anregung

Ziehe an dem Band (Pappband) im Hintergrund.

Beschreibe, was du siehst. Erläutere den Einfluss der Temperatur auf für den beobachteten Verlauf der Tinte.

Anregung

Überlege, ob du so etwas bereits aus der Natur kennst und vergleiche deine Beobachtungen hier mit denen aus der Natur.

Zusatzschritt



Versuche zu bestimmen, wie schnell sich die Tinte nach links bewegt. Nehme dafür das Lineal und lege es horizontal an die Scheibe. Messe die Zeit, in der die Tinte eine bestimmte Strecke zurücklegt.

Anregung

Stell den Golfstrom ab! Schalte die Steckdose aus, warte ein wenig und gebe wieder Tintentropfen an den beiden Stellen ins Wasser.

Beschreibe, wie sich die Tinte nun bewegt.

Überlege, was würde ein Versiegen des Golfstroms bedeuten (Ein Beispiel für die Tierwelt ist rechts aufgeführt).

Der Golfstrom transportiert zum Wasser auch Nährstoffe. Im Experiment konntest du sehen, dass der Wasserstrom die Tinte mitgezogen hat. Genauso werden Nährstoffe im Meer verteilt. Fische, Wale und sogar große Schiffe nutzen die warme Meeresströmung an der Oberfläche für den Transport. Dadurch sparen sie viel Energie bzw. Treibstoff. Viele Tierarten müssten ihre Lebensweise umstellen oder würden vermutlich aussterben, wenn dieses Förderband nicht mehr da wäre.

Abbildung 4 zeigt das Plakat hinter dem Exponat, das zum Handeln und Nachdenken anregt.

Erklärungen

Der Golfstrom strömt mit einer Geschwindigkeit von etwa 1,3 $\frac{\text{Meter}}{\text{Sekunde}}$!

- Im Golf von Mexiko scheint die Sonne sehr stark. Dies erwärmt sehr viel Wasser, auch das kalte Wasser in tieferen Bereichen. Warmes Wasser steigt gegenüber kaltem Wasser auf. Also steigt das Wasser aus den Tiefen kontinuierlich an die Oberfläche auf.
- Das aufsteigende Wasser verdrängt stetig das Oberflächenwasser und schiebt dieses weiter. Es fließt aus dem Golf von Mexiko an der Meeresoberfläche in Richtung Europa und gelangt bis in die Polarregionen. Auf seinem Weg verdunstet ein Teil des Wassers, wodurch sich der Salzgehalt des restlichen Wassers erhöht.
- Vor der Küste Europas und in den Polarregionen ist es kälter. Also kühlt sich das Wasser immer stärker ab. Deshalb schiebt sich das abgekühlte, salzhaltigere Wasser aus dem Golfstrom unter das salzärmere Wasser der Polarregion. Es sinkt also in die Tiefen.

Hier stellt die Heizung auf der rechten Seite die wärmende Sonne im Golf von Mexiko dar.

Im Experiment wird die Änderung des Salzgehaltes nicht repräsentiert.

Das Wasser im Experiment wird an den schwarzen Lamellen einer Kühlvorrichtung ähnlich wie am Polarkreis abgekühlt.

Einfluss der Sonnenstrahlung

Weil die Erde rund ist, verteilt sich das Licht der Sonne am Äquator auf eine kleinere Fläche. Im Bild unten kann man das gut erkennen, denn das Licht der Sonne ist hier als Lichtbündel (a und b) dargestellt.

Durch diese vom Breitengrad abhängige Verteilung des Sonnenlichts ist die Energiedichte beim Äquator am Boden größer – es ist dort also wärmer als fernab vom Äquator.

Über dem Äquator breitet sich das Licht über eine große Fläche aus. In den Breiten um den Äquator ist die Energie konzentriert.

Der Golfstrom in der Forschung

Seit Jahren wird über die Bedeutung des Golfstroms für das Klima diskutiert. Einige Wissenschaftler sind der Meinung, der Golfstrom könne durch die Globale Erwärmung versiegen, andere hingegen sehen den Strom nicht in Gefahr. Die Forscher sind sich auch uneins, ob sich das Klima in Europa durch ein Versiegen des Golfstroms sehr stark ändern würde. Einige sagen einen Temperaturabfall voraus. Andere hingegen meinen, die Globale Erwärmung gleiche die nunmehr fehlende Wärme vom Golfstrom aus. Das zeigt, dass die Wirkung des Golfstroms auf das Klima ein hochaktuelles Forschungsfeld ist!

Das globale Förderband

Der Golfstrom ist Teil eines Systems von verschiedenen Meeresströmungen, die ungeheure Mengen Wasser zwischen den Ozeanen transportieren. Die Strömungen haben dieselbe Ursache wie der Golfstrom: Unterschiede des Wassers bezüglich Temperatur und Salzgehalt. Beides führt zu Unterschieden in der Dichte des Wassers. Je kälter oder je salziger Wasser ist, desto höher ist seine Dichte. Umgekehrt ist die Dichte umso kleiner, je wärmer oder je salzärmer das Wasser ist. Wasser unterschiedlicher Dichte schichtet sich übereinander.

Insbesondere an der Wasseroberfläche sind neben der Dichte auch noch weitere Einflüsse für den Verlauf der Strömungen wichtig: Vorherrschende Winde treiben das Wasser an und die Erdumdrehung bewirkt, dass das Wasser nicht einfach nur geradeaus fließt, sondern zu Wirbeln abgelenkt wird.

Das globale Förderband ist ein geschlossener Kreislauf, aber es gibt verschiedene Wege, die das Wasser einschlagen kann. Es dauert bis zu 1000 Jahre, bis das Wasser das ganze Förderband durchlaufen hat!

Dichte, was ist das?

Dichte, das heißt Masse pro Volumen. Man bestimmt die Dichte von Wasser bei verschiedenen Temperaturen oder verschiedenen Salzgehalten so, dass man ein bestimmtes Volumen Wasser wiegt, dessen Salzgehalt und Temperatur man kennt. Anschließend teilt man die ermittelte Masse durch das Volumen des Wassers.

Auswirkungen des Golfstroms

Doch nur mit die Winterdurchschnittstemperatur in dieser Stadt. Vergleich die Werte der verschiedenen Städte! Was fällt dir auf?

Über dem Äquator breitet sich das Licht über eine große Fläche aus. In den Breiten um den Äquator ist die Energie konzentriert.

Der Wind wärmt sich über dem warmen Wasser des Golfstroms auf und strömt ins Landesinnere, sodass auch dort die Temperaturen steigen. Ohne den Golfstrom und die Winde wären die Temperaturen nur von der Sonneneinstrahlung abhängig. Dann müssten die Temperaturen in allen eingezeichneten Städten ungefähr im gleichen Bereich liegen (Hinweis: Kästen zum Einfluss der Sonnenstrahlung).

An der Station 4 zur Gezeitenwelle sind die Tide und die Erdrotation für die Bewegung von Wasser verantwortlich.

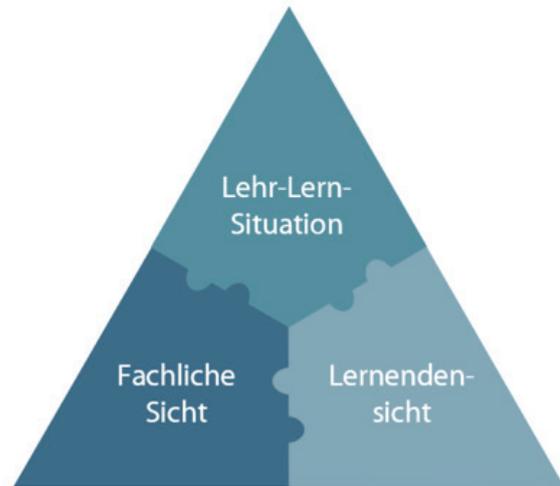
Abbildung 5 zeigt die Erklärtafeln, die der Besuchende aufklappen kann, um die Beobachtungen am Exponat auf das System Golfstrom zu übertragen. Die Ausstellung ist in den Nationalpark-Häusern Dangast und Norden-Norddeich erprobt und weiterentwickelt worden.

Die Physik des Wattenmeeres für Ausstellungen rekonstruieren: Strömungen als Ausgleichsphänomene!

Wegen der einzigartigen Artenvielfalt und der Dichte der Individuen ist das Wattenmeer aus biologischer Sicht als hochdynamischer Lebensraum weltbekannt. Doch nicht nur die belebte Natur, sondern auch die unbelebte Natur verfügt im Watt über eine ausgesprochen hohe Dynamik. Die enge Verflechtung begründet, weshalb viele Lebewesen im Watt exzellente Lebensbedingungen vorfinden. Das Kommen und Gehen des Wassers, die steife Brise an der Küste und die vielen, sich stetig ändernden Sandstrukturen sind nur einige Phänomene, die Menschen gleichermaßen faszinieren. Das Wattenmeer ist ein Ort, zu dem Menschen sich hingezogen fühlen, weil es Ursprünglichkeit ausstrahlt und eine positive Wirkung auf das Wohlbefinden besitzt. Dazu trägt neben der Tier- und Pflanzenwelt auch die Dynamik der unbelebten Natur bei. Deshalb lohnt es sich auch für die Besuchenden, einen Blick auf die physikalische Seite des Wattenmeeres zu werfen. Und damit besteht die Aufgabe für die Fachdidaktik, besuchergerechte Aufbereitungen der Inhalte zu leisten.

Um die Physik der Küste für Ausstellungen aufzubereiten, wird das fachdidaktische Modell der Didaktischen Rekonstruktion eingesetzt. Vereinfacht gesagt, fordert es zunächst eine Analyse der fachlichen Inhalte im interessierenden Themenbereich. Danach ist zu erheben, was Besuchende schon über den Themenbereich wissen, was ihre Sicht auf die Phänomene ist. Aufbauen auf dem Vergleich der fachlichen Perspektive und der Perspektive der Besuchenden wird dann eine Lehr-Lern-Situation geschaffen, z. B. ein Exponat zu einem bestimmten Phänomen. Die Lehr-Lern-Situation fügt sich dann wie ein Puzzleteil in die fachliche Sicht und in die Sicht der Besuchenden. Damit ist sie im besten Fall fachgerecht und besuchergerecht.

Für die Aufarbeitung der fachlichen Sicht auf die Physik der Küste und des Meeres gilt es, grundsätzliche fachliche Prinzipien, Ideen und Konzepte herauszuarbeiten, die im Bereich der Küstenphysik häufig vorkommen und daher viele Phänomene konsistent be-



schreiben können. Die Dynamik der unbelebten Natur erscheint zunächst einmal sehr komplex und undurchsichtig. Doch so unterschiedlich die genannten Phänomene auch sein mögen, umso mehr haben sie aus physikalischer Perspektive gemeinsam. Sie basieren auf physikalischen Grundprinzipien, die auch in anderen Bereichen der Physik vorkommen. Die meisten dynamischen Phänomene im Watt lassen sich auf Strömungen zurückführen oder aber auf **Strukturen**, die durch **Strömungen** hervorgerufen werden.

Das Prinzip des Ausgleich als Ursache für Strömungen

Strömungen von Wasser und Luft bedeuten den Transport von Materie (z. B. Sand oder Wasser) und von Energie (z. B. Wärmeenergie). Die Dynamik des Wattenmeeres beruht auf Materie- und Energieflüssen; dies stellt ein Grundprinzip nicht nur für das Wattenmeer dar. Auch Menschen sind dynamische Systeme, weil sie Nahrung aufnehmen, Energie verwerten und Abfallstoffe ausscheiden. Sie sind gezwungen, sich Materie- und Energieflüssen auszusetzen. Andernfalls herrscht statt Dynamik der Tod. Doch aus welchem Grund sind Strömungen von Wasser und Luft rund um den Globus präsent? Für Strömungen und die damit verbundenen Materie- und Energieflüsse braucht es zunächst Ungleichgewichte und Unterschiede wie die folgenden:

- Die Sonne erwärmt die Luft unterschiedlich stark. Dadurch gibt es Luft mit höherer und Luft mit niedrigerer Temperatur, sodass Druckunterschiede vorliegen, die als Hoch- und Tiefdruckgebiete bekannt sind.
- Die Sonne erwärmt auch das Meer unterschiedlich stark. Dadurch gibt es Wasser mit hoher und mit niedriger Temperatur. Auch verdunstet Wasser in einigen Gebieten stärker als in anderen. Wenn Wasser verdunstet, erhöht sich der Salzgehalt des verbliebenen Wassers. Es kommt daher letztlich zu Salzgehaltunterschieden.

Eine Strömung entsteht, wenn sich die beschriebenen Ungleichgewichte bzw. Unterschiede wieder ausgleichen. Die Ungleichgewichte sind also der Antrieb für eine Strömung. Das Prinzip des Ausgleichs ist ein grundlegendes Naturprinzip. Die Prozesse laufen in Richtung des so genannten thermodynamischen Gleichgewichts ab. Das bedeutet, dass es aus rein statistischer Sicht am wahrscheinlichsten ist, einen Ausgleich zu erhalten, denn „dorthin führen viele Wege“, zum Ungleichgewicht nicht. So gleichen sich die im Beispiel beschriebenen Druckunterschiede aus, wobei Wind entsteht. Es kommt zu einem Temperaturengleich bzw. Ausgleich des Salzgehaltes, die mit einer Wasserströmung einhergehen (wie beim Golfstrom). Oder es kommt durch die Stöße der Wassermoleküle zu einem Ausgleich des Impulses innerhalb des Wassers. In jedem Fall setzen also Materie- und Energieströme ein und begründen die Dynamik im Wattenmeer.

Das Ausgleichsprinzip kommt auch in anderen Bereichen der Physik vor. Sogar die Wirkung einer Batterie lässt sich mit dem Prinzip des Ausgleichs verdeutlichen. Die Symbole „+“ und „-“ auf der Batterie sollen ein Ungleichgewicht deutlich machen: beide Seiten sind unterschiedlich geladen. Wenn die Batterie in ein Gerät eingesetzt wird, dann lässt sich das Gerät betreiben, es herrscht Dynamik. Es kommt zu Strömen, bei denen sich Ladungen ausgleichen, bis die Batterie umgangssprachlich leer ist, bis also ein Ausgleich der Ladungen stattgefunden hat.

Warum gleicht sich auf der Erde nicht alles aus und steht dann still? Zwar wird der ausgeglichene Zustand auf der Erde ständig angestrebt, aber die Erwärmung durch die Sonne und auch die Anziehungskräfte von Sonne und Mond sorgen kontinuierlich dafür, dass die

Erde in ein erneutes Ungleichgewicht gerät. Die Erde ist zwar auf einem immer währenden Weg in den Ausgleich, aber die Dynamik in Form von Strömungen von Materie und Energie bleibt erhalten und ist ständig präsent.

Auch dies lässt sich mit Elektrizität vergleichen, z.B. bei der Steckdose: Sie bietet Zugang zu einem permanenten Ungleichgewicht, das Kraftwerke hervorrufen. Man könnte behaupten, die primäre Aufgabe eines Kraftwerks ist es, mit unterschiedlichsten Mitteln ein Ungleichgewicht von Ladungen zu erzeugen, das dann im Haushalt genutzt werden kann, um Geräte zu betreiben.

