

Elementarisierungen zu Strömungen und Strukturbildungen

Kai Bliesmer, Michael Komorek

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Carl-von-Ossietzky-Straße 9-11, 26129 Oldenburg
kai.bliesmer@uni-oldenburg.de, michael.komorek@uni-oldenburg.de

Kurzfassung

Die Nationalparkhäuser des Niedersächsischen Wattenmeeres sind außerschulische Lernorte. Dort thematisieren die Betreiber/innen mit ihren Ausstellungen die systemische Dynamik an der Küste und im Ozean. Allerdings mangelt es an Exponaten, die Phänomene unter physikalischer Perspektive beleuchten und passende Erklärungen sowie Modelle anbieten. Die physikalische Sichtweise auf dynamische Prozesse in der Küsten- und Ozeanregion ist jedoch unabdingbar, da erst die Interdependenz von Strömungen und Strukturbildungen die systemische Dynamik dieser Regionen konsistent charakterisiert. Um die Ausstellungen diesbezüglich weiterzuentwickeln, wird eine Didaktische Rekonstruktion vorgenommen, deren Kern die Elementarisierung von Strömungen und Strukturbildungen darstellt. Ziel ist die Formulierung von didaktischen Leitlinien für die zukünftige Ausstellungsgestaltung. Diese soll den Betreiber/innen der Nationalparkhäuser dabei helfen, Strömungs- und Strukturphänomene für zukünftige Exponate aufzubereiten.

1. Einleitung

Die Dynamik von Wasser, Luft und granularer Materie in Form vielgestaltiger Strömungs- und Strukturbildungsphänomene prägt das Erscheinungsbild von Küstengebieten rund um den Globus. Durch komplexe systemische Wechselwirkungen werden weitläufige Küstenstrukturen erzeugt, die verschiedensten Organismen als überaus geeignete Lebensräume dienen und wiederum selbst von ihnen geformt werden. Das gilt insbesondere für das Wattenmeer der Nordsee – ein äußerst produktives Ökosystem mit hoher physikalischer Dynamik. Die ausgeprägte Interdependenz dieser physikalischen Dynamik und der biologischen Vielfalt galt für die Welterbekommission der UNESCO als bestechendes Argument, das Wattenmeer in ihren Katalog der Weltnaturerben aufzunehmen (UNESCO World Heritage Committee, 2009, S. 183-186). Um den erlangten Status als Weltnaturerbe sowohl zu popularisieren als auch zu plausibilisieren, sind mit Fokus auf das Wattenmeer allein in Niedersachsen 18 Nationalparkhäuser gegründet worden, die als außerschulische Lernorte dienen und jedermann, insbesondere Schüler/innen, Zugang bieten.

In den Ausstellungen der Nationalparkhäuser wird thematisiert, dass es sich bei Küstengebieten um bedeutsame Lebens- und Wirtschaftsräume handelt, die bisweilen sensibel und komplex auf klimatische Veränderungen und Umwelteinflüsse reagieren. Im Hinblick auf ihre außerschulischen Lernangebote sind die Leiter/innen der Nationalparkhäuser also als „Ausstellungsmacher/innen“ tätig. Die Ausstellungen sind Gegenstand des hier beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsvorhabens.

2. Vorstudien

Um das Forschungs- und Entwicklungsfeld der Ausstellungen zu Küsten- und Meeresregionen aufzuschließen, wurden zwei Vorstudien (Bliesmer, 2016; Roskam, 2016) durchgeführt. Das Erkenntnisinteresse orientierte sich daran, inwiefern physikalische Inhalte in den Ausstellungen angesprochen werden, wer an der Aufbereitung beteiligt ist und nach welchen Prinzipien sie erfolgt. Zur Klärung wurden in beiden Vorstudien leitfadengestützte, teilstandardisierte Experteninterviews durchgeführt; und zwar mit den Ausstellungsmacher/innen der Nationalparkhäuser bzw. mit den pädagogisch Verantwortlichen der Bildungsangebote an Meeresforschungsinstituten. Auch Forschungsinstitute thematisieren Inhalte zur Küsten- und Meeresdynamik, sodass sich ein breiteres Feld entsprechender außerschulischer Lernangebote im Themenfeld ergab.

Die Ergebnisse der Vorstudien zeigen, dass in den vorgehaltenen Bildungsangeboten eine starke Fokussierung auf biologische Aspekte vorherrscht. Phänomene an der Küste und im Ozean werden nur sehr selten aus physikalischer Sicht betrachtet. Physikalische Erklärungen und Modelle kommen nur am Rande vor. Begründet wird dies mit der hohen Komplexität entsprechender Inhalte, die Besuchenden überfordere. Allerdings wünschen sich die Ausstellungsmacher/innen mehr angemessen aufbereitete physikalische Inhalte in ihren Ausstellungen; insbesondere dazu, die Klassifizierung des Wattenmeeres als Weltnaturerbe im Sinne der UNESCO abbilden zu können. Allerdings steht ihnen ein physikalischer Zugang wegen ihres beruflichen Werdegangs eher fern. Gleiches gilt für fachdidaktische Überlegungen zur Planung neuer Ausstellungsexpo-

nate. Diesbezüglich wird direkt mit Werkstätten und Ausstellungsagenturen kooperiert. In dieser Kooperation wird vor allem Wert auf eine ästhetische Raumgestaltung und einen stabilen Exponatbau gelegt, sodass optisch ansprechende und robuste Ausstellungsstücke entstehen. Allerdings verfügt kaum einer der Beteiligten über eine ausgewiesene Expertise zur physikdidaktischen Analyse und Aufbereitung neuer Inhalte, um sie in lernwirksame Exponate zu überführen. Die in den Vorstudien identifizierten Defizite und Wünsche der Ausstellungsmacher/innen geben daher Anlass für breite physikdidaktische Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten, die in fruchtbare Weiterentwicklungen der Ausstellungen münden können.

3. Zielsetzungen

Das Ziel des hier vorgestellten Vorhabens ist eine solche Weiterentwicklung der Ausstellungen in den Nationalparkhäusern, dass physikalische Aspekte der Küsten- und Meeresdynamik integrale Bestandteile ihrer Exponate werden. Durch die Vorstudien (Bliesmer, 2016; Roskam, 2016) lassen sich Ziele auf zwei Ebenen formulieren:

- Die physikdidaktische Aufarbeitung von Strömungs- und Strukturphänomenen, die physikalische Aspekte der Küsten- und Meeresregion in Ausstellungen verdeutlichen.
- Das Ausarbeiten des Vorgehens, sodass Ausstellungsmacher/innen die fachdidaktische Idee des Aufeinanderbeziehens von Fach- und Lernendenperspektive verständlich wird.

Beide Ziele sind ein Ausdruck der Maxime, Ausstellungsmacher/innen anzuregen, *selbst* aktiv zu werden. Wir verfolgen nicht das Ziel, eigene Exponate zu bauen, um deren Ausstellungen zu ergänzen. Im konkreten Bau der Exponate sind die Beteiligten uns Physikdidaktiker/innen im Hinblick auf Ästhetik und Haltbarkeit ohnehin überlegen. Der Mangel besteht vielmehr hinsichtlich fachdidaktischer Planungskompetenz, sodass es hier um die Unterstützung geht, Exponate auf Basis fachdidaktischer Grundideen zu planen.

Dazu werden *Leitlinien für Ausstellungsmacher/innen* zum Themenfeld der Strömungs- und Strukturphänomene formuliert, die es ihnen ermöglichen sollen, fachwissenschaftliche Sachstrukturen von Strömungs- und Strukturphänomenen für lernwirksame Exponate zu rekonstruieren.

4. Forschungs- und Entwicklungsmodell

Die angestrebten Leitlinien fußen auf einer vorzunehmenden Elementarisierung (Bleichroth, 1991) zu Strömungen und Strukturbildungen, gehen aber auch darüber hinaus, um die praktische Anwendbarkeit für die AusstellungsmacherInnen zu gewährleisten. Die Leitlinien müssen zum einen dabei helfen, die fachwissenschaftlichen Sachstrukturen der Strömungs- und Strukturphänomene zu entschlüsseln,

die sie in den Ausstellungen thematisieren wollen. Deshalb stellen die Leitlinien die fachlichen Kerne (Elementaria) der zugehörigen Inhalte dar, die mit Blick auf mögliche Besuchende herausgearbeitet werden. Zum anderen müssen derartige Leitlinien dabei helfen, die fachwissenschaftlichen Sachstrukturen so zu rekonstruieren, dass *Sachstrukturen für Vermittlungszwecke* entstehen. Deshalb werden Hinweise unterbreitet, wie die Elementaria mit kontextspezifischem Wissen angereichert, verknüpft und so zu einer Sachstruktur für Vermittlungszwecke rekonstruiert werden können.

Die zu entwickelnden Leitlinien lassen sich im Forschungs- und Entwicklungsmodell der Didaktischen Rekonstruktion (Duit et al., 2012) verorten; dort sind sie der didaktischen Strukturierung gleichbedeutend.



Abb.1: Didaktische Rekonstruktion zur Entwicklung von Ausstellungen (modifiziert nach Duit et al., 2012)

Die grafische Darstellung zeigt die vorzunehmende Elementarisierung im Zentrum. Sie ist zunächst zu leisten. Dazu bedarf es sowohl einer sachstrukturellen Analyse als auch einer empirischen Untersuchung der Lernendenvorstellungen von Strömungs- und Strukturbildungsphänomenen.

Die Elementarisierung befindet sich gewissermaßen im Spannungsfeld des fachdidaktischen Triplets, das dadurch die Aufgabenstellung für den Forschungsprozess vorgibt: Es ist zu klären, welche Elementarisierungsprozesse sich im Themengebiet von Strömungs- und Strukturphänomenen durchführen lassen. Diese müssen einen Bezug zu den Ergebnissen einer fachlichen Analyse haben, einen Bezug zu den empirisch erhobenen Vorstellungen der Lernenden und einen Bezug zu dem Ziel, Leitlinien für Ausstellungsmacher/innen zu entwickeln. Ist die Elementarisierung abgeschlossen, muss sie angereichert werden, um die angestrebten Leitlinien zu entwickeln.

Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion dient als zentrales Strukturierungsmittel. Hier werden alle zu leistenden Teilaufgaben zusammengeführt. Deshalb gibt das Modell die Struktur nachfolgender Kapitel vor.

4.1. Fachwissenschaftliche Perspektive

Strömungs- und Strukturphänomene stellen sich an der Küste und im Ozean in Form von vielerlei Erscheinungen dar: Rippel, Dünen, Tsunamis, Monsterwellen sowie Wirbelstraßen und Strudel sind nur einige Beispiele und zeugen von einem beachtlichen

Potenzial, sie unter physikalischer Perspektive zu thematisieren. Im Hinblick auf eine vorzunehmende Elementarisierung ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Phänomenen quasi um Kontexte handelt, die in abstrakte physikalische Wissensbereiche eingebettet sind. Die Identifizierung grundlegender und gemeinsamer fachlicher Inhalte der vielgestaltigen Strömungs- und Strukturbildungsphänomene ist der erste Schritt der Elementarisierung.

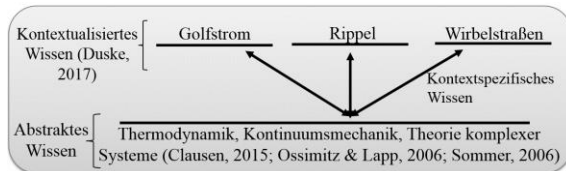


Abb.2: Physikalische Wissensgebiete als fachlicher Kern verschiedener Strömungs- und Strukturphänomene

Zu den grundlegenden Bereichen zählen Thermodynamik, Kontinuumsmechanik und insbesondere auch die Theorie komplexer Systeme. Die Bedeutung letzterer wird im Folgenden anhand von fünf Charakteristika komplexer Systeme näher verdeutlicht. Sie wurden mit Aspekten der Kontinuumsmechanik und Thermodynamik verknüpft und bezogen auf den Kontextbereich der Strömungs- und Strukturphänomene in der Küsten- und Meeresregion herausgearbeitet. Dazu wurde eine Analyse fachwissenschaftlicher Literatur zur Thermodynamik (u.a. Blundell & Blundell, 2010), zur Kontinuumsmechanik (u.a. Spurk & Aksel, 2010; Durst, 2006) und zur Theorie komplexer Systeme (u.a. Bar-Yam, 2003; Mainzer, 1999) vorgenommen.

Mit den fünf Charakteristika wurde ein fachliches Konstrukt erzeugt, das zentrale Inhalte der Nichtgleichgewichtsthermodynamik sowie der nichtlinearen Dynamik abbildet und dabei die Küsten- und Meeresregion als ein komplexes System erachtet.

4.1.1. Charakteristikum der Emergenz

Die Theorie komplexer Systeme sieht ein System als einen Verbund von Systemelementen an, die in komplexer Weise miteinander wechselwirken. Das führt zu neuen Systemeigenschaften und Strukturen, die nicht durch eine Betrachtung einzelner, isolierter Elemente erklärt werden können (Bar-Yam, 1997). Werden Elemente verändert oder gar entfernt, hat dies Auswirkungen auf das gesamte System. Die Intensität der Auswirkungen hängt davon ab, wie robust oder sensibel es auf Veränderungen reagiert. Das *Ganze* ist also im wahrsten Sinne mehr als *die Summe seiner Teile*. Mit Blick auf das Studium komplexer Systeme spricht Clausen (2015) von einer notwendigen Überwindung der ehemals erfolgreichen mechanistischen Vorstellung, man könne ein System einzig durch das Zerlegen und Studieren seiner Bestandteile verstehen lernen. Nach Bar-Yam (2007) müssen die Bestandteile komplexer Systeme stets im Kontext des Gesamtsystems betrachtet werden. Diesen Umstand erklärt Pfeiler (2016) mit einem fehlenden Superpositionsprinzip, was sich

durch die hohe Interpendenz der Systembestandteile begründet. An seine Stelle träten andere Prinzipien wie etwa ein multiplikatives Skalenprinzip (Selbstähnlichkeit).

Alle aufgeführten Struktur- und Strömungsphänomene lassen sich als komplexe Systeme fassen. In ihnen wechselwirken Luft- bzw. Wasserströmungen dynamisch und komplex mit weiterer Materie an der Küste und im Ozean; sie alle sind damit Systemelemente. Schon das Beispiel von Sandrippeln vermag das zu illustrieren: Die Rippelstrukturen ergeben sich durch ein komplexes Zusammenspiel einer Vielzahl von Sandkörnern mit einer Luftströmung (äolische Rippel) bzw. einer Wasserströmung (aquatische Rippel). Die Bewegung eines einzelnen Sandkorns kann die Entstehung von Rippeln nicht erklären; ein Sandkorn vermag kein Rippelmuster zu bilden. Erst das kollektive Zusammenwirken vieler Sandkörner erzeugt eine Eigenschaft des Systems, in dem die Körner und strömende Fluide Systemelemente darstellen.

4.1.2. Charakteristikum der Offenheit

Komplexe Systeme sind gedankliche Konstruktionen, bei denen immer bestimmte Elemente in den Blick genommen werden, deren Zusammenspiel interessantes Verhalten bewirkt (Bar-Yam, 1997). Es werden demnach Grenzen gezogen, Systemgrenzen, die aber nicht räumlich gemeint sind und das System abschließen oder gar isolieren (Grotzinger & Jordan, 2017). Komplexe Systeme sind offen.

Eine wichtige Zustandsgröße zur Unterscheidung von offenen und isolierten Systemen ist die Entropie S . Allgemein kann ihre Veränderung entweder durch einen Entropieaustausch mit der Umgebung erfolgen oder durch eine Entropieproduktion im Systeminneren (Prigogine, 1978).

$$dS = d_e S + d_i S \quad \{1\}$$

In isolierten Systemen außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts wird gemäß dem 2. Hauptsatz solange Entropie produziert, bis das System einen Gleichgewichtszustand erreicht (Blundell & Blundell, 2010). Die Einstellung des Gleichgewichts erfolgt über Flüsse von Materie und Energie J_i im System. Da es in isolierten Systemen per Definition keinen Entropieaustausch mit der Umgebung gibt, gilt:

$$dS > 0, \text{ weil } d_e S = 0 \wedge d_i S > 0 \quad \{2\}$$

Die Entropieproduktion im Inneren ist beendet, wenn das System das thermodynamische Gleichgewicht erreicht. In diesem Zustand ist die Systementropie maximal und es findet keinerlei Veränderung mehr statt.

$$dS = d_e S = d_i S = 0 \quad \{3\}$$

Daran ist zu erkennen, dass es sich beim thermodynamischen Gleichgewichtszustand um einen stabilen *Attraktor* für isolierte Systeme handelt (Prigogine, 1978). Denn das isolierte System würde nach jedem Eingriff, der es vom Gleichgewicht entfernt, mit der

Zeit unweigerlich dorthin zurückkehren. Einflüsse werden quasi gedämpft (Schurz, 2006).

Offene Systeme unterscheiden sich von geschlossenen insofern, als sie kein thermodynamisches Gleichgewicht erreichen können, weil es im System ständig Zu- und Abflüsse J_i von Materie und Energie gibt. Allerdings sind in offenen Systemen zwingend zwei verschiedene Entfernungen vom thermodynamischen Gleichgewicht zu unterscheiden (Schurz, 2006; Schlichting, 2000):

In die erste Kategorie fallen offene Systeme, die sich noch relativ nahe am thermodynamischen Gleichgewicht befinden. Sie können einen speziellen Zustand einnehmen, in dem sich die Zu- und Abflüsse von Energie und Materie die Waage halten.

$$\sum J_i = 0 \quad \{4\}$$

Er wird als Fließgleichgewicht bezeichnet und repräsentiert einen Zustand, in dem die Entropieproduktion im Inneren einem Minimum entgegenstrebt.

$$d_i S \rightarrow \min \quad \{5\}$$

Jenes ist gleichbedeutend mit einer Minimierung der Dissipation im System. Es ist daher als Prinzip minimaler Dissipationsrate bekannt, das von Prigogine (1978) formuliert wurde. Die Fließgleichgewichte sind damit stabile Attraktoren für offene Systeme nahe am thermodynamischen Gleichgewicht. Nach jedem Eingriff in das System kehrt es also mit der Zeit wieder in den Fließgleichgewichtszustand zurück. Auch hier werden Einflüsse also gedämpft.

Die zweite Kategorie beinhaltet Systeme fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht. Die genannten Prinzipien der Entropiemaximierung oder der Minimierung der Dissipationsrate gelten hier nicht. Es herrschen also keine stabilen Attraktoren vor. Einflüsse in solche Systeme werden folglich nicht unbedingt gedämpft, sodass diese Systeme ein sehr interessantes und kontraintuitives Verhalten zeigen können (Schurz, 2006). Zu genau dieser Kategorie gehören die komplexen Systeme und damit auch die Küsten- und Meeresregionen.

4.1.3. Charakteristikum der Dynamik

Die geschilderten Materie- und Energieflüsse treten außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts auf und sind ein Ausdruck von Dynamik. Da sie in offenen, komplexen Systemen stets präsent sind, ist Dynamik ein wesentliches Charakteristikum. Sie wird von thermodynamischen Kräften X_i angetrieben (Blundell & Blundell, 2010). In geschlossenen und offenen Systemen nahe dem thermodynamischen Gleichgewicht hängen sie über einen Proportionalitätsfaktor L linear mit den Materie- und Energieflüssen zusammen (Schurz, 2006).

$$J_i = L \cdot X_i \quad \{6\}$$

Thermodynamische Kräfte sind zum Beispiel Temperatur- oder Konzentrationsgradienten. In ihrer Folge setzen Flüsse von Materie und Energie in Richtung des thermodynamischen Gleichgewichts ein. Da sich die Gradienten durch diese Flüsse ver-

ringern, sind sie als *Ausgleichsprozesse* zu deuten, die einen Wärme- bzw. Massentransport repräsentieren. In geschlossenen Systemen können solche Gradienten vollständig verschwinden, in offenen Systemen nicht. Dort sind sie stets vorhanden und mit ihnen geht eine Veränderung der inneren Entropie einher (Prigogine, 1978). In der Nähe des thermodynamischen Gleichgewichts gilt:

$$\frac{d_i S}{dt} = \sum_i J_i \cdot X_i > 0 \quad \{7\}$$

Mit Blick auf den Kontext des Küsten- und Meeresystems vollziehen sich die Wärme- und Massentransportprozesse in den Fluiden Luft und Wasser. Es müssen allerdings Transportprozesse, die sich auf mikroskopischer Ebene ereignen, von denen auf makroskopischer Ebene unterschieden werden (Wilde, 1978; Spurk & Aksel, 2010).

Auf der mikroskopischen Ebene setzen molekulare Transportprozesse ein, die auf der unablässigen Molekularbewegung der konstituierenden Teilchen beruhen. Dadurch setzt bei vorhandenen Gradienten ein Fluss von Wärme und Masse (bzw. Stoffmenge) gemäß Gleichung {6} ein. Die Proportionalitätsfaktoren sind in diesem Fall der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient (vgl. {8}) bzw. der Diffusionskoeffizient (vgl. {9}) (Kraume, 2012; Wilde, 1978).

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \lambda \cdot \frac{dT}{dy} \quad \{8\}$$

$$\dot{n} = D \cdot \frac{dc}{dy} \quad \{9\}$$

Je höher die Temperatur- und Konzentrationsgradienten werden, desto höher werden auch die Dichtegradienten im Fluid. Dies führt zu immer höheren inneren Kräften, die bewirken, dass Luft und Wasser mit einer Geschwindigkeit v_x zu strömen beginnen. Das ist die sogenannte freie Konvektion (Spurk & Aksel, 2010). Durch die makroskopische Fluidbewegung werden die auf der Molekularbewegung basierenden Transportprozesse von zusätzlichen konvektiven Prozessen überlagert. Für eine eindimensionale Strömung (Bartelmann et al., 2015) gilt:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = c_p \cdot T \cdot \rho \cdot v_x \quad \{10\}$$

$$\dot{n} = c \cdot A \cdot v_x \quad \{11\}$$

Zusätzlich zu Temperatur- und Konzentrationsgradienten sind äußere Kräfte auf ein Fluid eine weitere Möglichkeit, Strömungen hervorzubringen. Die Gezeiten sind ein Beispiel. Solche Strömungen werden erzwungene Konvektion genannt. Dabei kommt es zu einer Übertragung von Impuls durch das Fluid. Und auch hier gibt es eine molekulare und eine konvektive Variante. Mit dem bedeutenden Unterschied allerdings, dass die molekulare Variante nicht unabhängig von der konvektiven auftritt. Zwar finden

auch im ruhenden Fluid molekulare Stöße statt, allerdings wird in der Bilanz kein gerichteter Impuls übertragen. Und sobald äußere Kräfte wirken, also ein Impuls von außen übertragen wird, beginnen die Fluide wegen ihrer Schubspannungsfreiheit sofort zu strömen, sodass augenblicklich konvektive Transportprozesse einsetzen. Die äußeren Kräfte führen dabei zu Impulsdichtegradienten dI_x/dy im Fluid. Das erklärt die Verzerrung der Fluide. Der Impulsdichtegradient ist einer Verzerrungsgeschwindigkeit τ über die kinematische Viskosität ν proportional (Worthoff & Siemens, 2012). Für die molekulare Variante gilt:

$$\tau = \nu \cdot \frac{dI_x}{dy} \quad \{12\}$$

Auf makroskopischer Ebene kommt es durch die Fluidbewegung mit der Zeit zu einer räumlichen Verteilung des Impulses (Bartelmann et al., 2015).

$$\frac{\dot{P}}{A} = \rho \cdot v_x^2 \quad \{13\}$$

In Systemen fernab vom Gleichgewicht hängen die thermodynamischen Kräfte nicht mehr gemäß Gleichung {6} mit den Materie- und Energieflüssen zusammen, sondern haben komplexere Gestalt. Entsprechend sind auch die Transportgleichungen komplexer (Schurz, 2006). Dennoch zeigt die Betrachtung in einfacheren Systemen, dass es im Wesentlichen drei Faktoren gibt, welche die Dynamik, auch im komplexen Küsten- und Ozeansystem, antreibt: (1) Temperatur- und (2) Konzentrationsgradienten in den Fluiden (freie Konvektion) sowie äußere Kräfte auf das Fluid (erzwungene Konvektion). Zentral für die Dynamik an der Küste und im Ozean sind somit die Strömungen von Luft und Wasser.

4.1.4. Charakteristikum der Nichtlinearität

Das komplexe Verhalten in den emergenten, offenen und dynamischen Systemen äußert sich in Form von Kreisläufen sowie Rückkopplungen negativer (Regulation) und positiver Art (Verstärkung) (Bar-Yam, 1997). Ferner können in den Systemen sogenannte Kippunkte vorkommen, die auch als *tipping points* (Gladwell, 2001) bekannt sind. Ein Beispiel hierzu ist das Umkippen eines Gewässers.

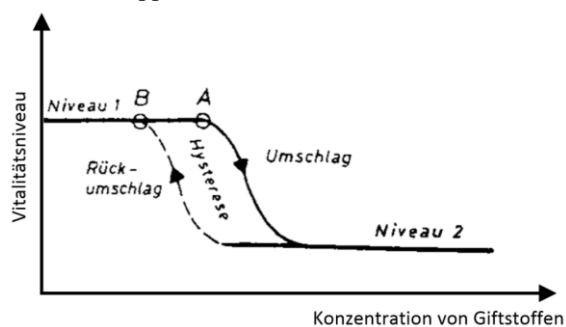


Abb.3: Vitalitätsniveau eines Gewässers in Abhängigkeit von dessen Giftkonzentration (modifiziert nach Schurz, 2006, S. 30)

In diesem Beispiel verhält sich das Gewässersystem in bestimmten Bereichen robust. So könnte man zu der tückischen Folgerung gelangen, das Vitalitätsniveau sei gänzlich unabhängig von der Giftstoffkonzentration. In anderen Bereichen allerdings reagiert das System äußerst sensibel. Denn bei einer bestimmten Giftstoffkonzentration bewirkt eine unwesentliche Erhöhung derselben ein drastisches Absinken des Vitalitätsniveaus. Überdies zeigt sich ein Hystereseverhalten, sodass die Giftstoffkonzentration weit unter den ursprünglichen Wert zurückgeführt werden muss, um das anfängliche Vitalitätsniveau wiederherzustellen.

Jacobeit (2007) nutzt solche Prinzipien komplexen Systemverhaltens zur Beschreibung des Klimasystems. Schurz (2006, S. 11) nennt diese Prinzipien „Systemgesetze“. Er setzt sie in Beziehung zu den Naturgesetzen, und führt aus, dass sie zwar auf letzteren beruhen, nicht jedoch deren Strenge aufweisen. In bestimmten Bereichen vermag ein komplexes System daher Einflüsse zu tolerieren, wobei die Pufferkapazitäten allerdings begrenzt seien.

Die genannten Systemgesetze illustrieren auch einen starken Zusammenhang zum deterministischen Chaos. Das Beispiel der Rippelbildung verdeutlicht, dass die Bewegung einzelner Sandkörner deterministisch ist. Genauso wie die Bewegung von Wasser- und Luftmassen bei der Entstehung tropischer Wirbelstürme. Dennoch lässt sich deren Struktur nicht beliebig genau vorhersagen. Zum einen wegen der hohen Anzahl beteiligter Systemkomponenten, zum anderen aber auch wegen der – in der Chaostheorie zentralen – infinitesimal sensitiven Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen (Mainzer, 1999).

Alle Darlegungen knüpfen an die benannten Materie- und Energieflüsse im vorigen Kapitel an. Lediglich in der Nähe des thermodynamischen Gleichgewichts kann ihr Zusammenhang zu den antreibenden thermodynamischen Kräften linear modelliert werden. Komplexe Systeme befinden sich fernab des thermodynamischen Gleichgewichts, lineare Modellierungen genügen dort nicht (Prigogine, 1978). Die hier aufgeführten Systemgesetze sind ein Ausdruck dafür, dass nichtlineare Modellierungen nötig sind, um komplexe Systeme näher zu beschreiben.

$$J_i = f(X_i) \quad \{14\}$$

Dahingehend manifestiert sich die Herausforderung bei der Auseinandersetzung mit Strömungs- und Strukturphänomenen im kontraintuitiven Verhalten. Dazu zählt auch die Schwierigkeit, dass in bestimmten Bereichen schon kleine Einflüsse große Veränderungen nach sich ziehen, die zudem in beachtlichem räumlichen oder zeitlichen Abstand zum ursprünglichen Einfluss stehen können.

4.1.5. Charakteristikum der Selbstorganisation

Der für diesen Kontextbereich bedeutendste Ausdruck nichtlinearen Verhaltens ist die Selbstorganisation (Mainzer, 1999). Denn die Systemzustände stehen für vielgestaltige räumliche und zeitliche

Strukturen und damit für den zweiten interessierenden Phänomenbereich. Schon im Gewässerbeispiel in Abb. 3 sind zwei Vitalitätszustände zu erkennen, die von der Giftstoffkonzentration abhängig sind und als selbstorganisierte Strukturen begriffen werden können. Auch viele weitere Phänomene an der Küste und im Ozean können im Hinblick auf ihre strukturbildenden Merkmale betrachtet werden: die Solitonen bei Tsunamireignissen, die Konvektionszelle beim Golfstrom, die Periodizität der Gezeiten oder auch die Anhäufung granularer Materie bei Rippeln, Dünen und der Verlagerung ganzer Inseln.

Für alle sind Selbstorganisationsprozesse maßgeblich, und für diese wiederum statistische Schwankungen im System (Prigogine, 1978; Schurz, 2006). Bereits die Maxwell-Boltzmann-Verteilung zeigt, dass die Molekülgeschwindigkeiten in einem Gas statistisch verteilt sind. Auch für andere Größen gelten statische Verteilungen, innerhalb derer Systemkomponenten fluktuieren. Diese zufälligen Fluktuationen werden in offenen Systemen fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht nicht unbedingt gedämpft, weil es keine stabilen Attraktoren gibt. Sie können daher anwachsen. Um dies zu quantifizieren, führte Prigogine (1978) Berechnungen durch und zeigte den Einfluss einer Fluktuation anhand folgender Gleichung 2. Ordnung.

$$S = S_0 + \delta S + \frac{1}{2} \delta^2 S \quad \{15\}$$

Hierbei bezeichnet S_0 die maximale Entropie im thermodynamischen Gleichgewicht und δ den Grad der Fluktuation. In der Nähe des Gleichgewichts, in denen stabile Attraktoren vorherrschen, ist der Term 1. Ordnung wegen der Maximierung der Entropie gleich null. Damit ist die Differenz zwischen momentaner Entropie S und maximaler Entropie S_0 nur durch den Term 2. Ordnung gegeben. Er wird als Exzessentropie (Prigogine, 1978; Schurz, 2006; Olah, 2011) bezeichnet. Die Exzessentropie muss stets negativ sein, da S_0 das Maximum der Entropie darstellt. Allerdings hängt von ihrer Veränderung ab, ob das System stabil ist oder nicht. In Systemen nahe am thermodynamischen Gleichgewicht werden Einflüsse gedämpft. Beim Zubewegen auf den Gleichgewichtszustand – ein stabiler Attraktor – ist die Veränderung der Exzessentropie also positiv. Denn sie wächst ausgehend von einem negativen Wert an und verschwindet im Gleichgewichtszustand schließlich. Damit gilt für stabile Zustände:

$$\frac{d(\delta^2 S)}{dt} > 0 \quad \{16\}$$

Fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht werden Einflüsse nicht unbedingt gedämpft, da keine stabilen Attraktoren existieren. Hier kann die Exzessentropie ausgehend von einem negativen Wert immer kleiner werden, also ins Negative anwachsen. Daher gilt für die Exzessentropieproduktionsrate in solchen instabilen Systemzuständen:

$$\frac{d(\delta^2 S)}{dt} < 0 \quad \{17\}$$

Die Exzessentropieproduktionsrate kann somit als Stabilitätskriterium fungieren (Olah, 2011) und beschreibt, wie sich Fluktuationen auswirken. Im komplexen System können Fluktuationen anwachsen und es kommt zu einer positiven Rückkopplung, einer Selbstverstärkung. Die zufällige Veränderung einer Systemkomponente bewirkt also, dass andere in gleicher Weise beeinflusst werden.

Haken (1991) prägte diesbezüglich den Begriff der Versklavung. Entscheidend für die Selbstorganisation ist allerdings das Wechselspiel zwischen positiven und negativen Rückkopplungen (Schlichting, 2000). Ab einem bestimmten Verstärkungsgrad treten negative Rückkopplungen zunehmend zutage, sodass der Verstärkung Grenzen gesetzt werden. Das System regelt sich ein. Es organisiert sich selbst.

Dass es sich dabei um eine Strukturbildung handelt, wird erneut am Beispiel der Sandrippel deutlich. Wegen statistischer Fluktuationen sind die Sandkörner nicht gleichmäßig verteilt. An einem Ort mit zeitweilig höherer Dichte an Sandkörnern, kommt es durch die vermehrten Stöße zu einer höheren Dissipation als an Orten mit weniger Sandkörnern. Folglich ist die durchschnittliche kinetische Energie von Sandkörnern an Orten mit mehr Körnern geringer als an Orten mit wenigen Körnern. Daher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich Sandkörner von bereits entstandenen Anhäufungen entfernen geringer als der umgekehrte Fall. Dies begründet die Selbstverstärkung im System. Allerdings können die Anhäufungen nicht beliebig stark anwachsen. Je höher die Anhäufung wird, desto steiler wird sie. Bei einer bestimmten Steilheit wird ein kritischer Winkel erreicht, ab dem die Gravitation dafür sorgt, dass die Körner von der Anhäufung hinunterrollen. Dieser Effekt komplettiert das Wechselspiel positiver und negativer Rückkopplungen (Schlichting & Nordmeier, 1996). Es bewirkt eine Selbstorganisation im System aus Sand und Strömungen.

Der Prozess ist als dissipative Strukturbildung bekannt (Schlichting, 2000). Die auslösenden Fluktuationen bilden gewissermaßen den Keim von Ordnung in einem System, das sich durch nichtlineares Verhalten auf Basis deterministischer Funktionen selbst zu organisieren vermag.

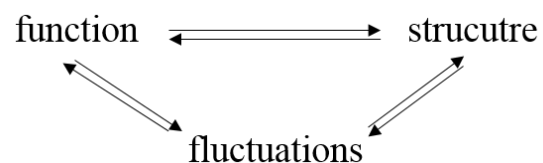


Abb. 4: Das Zusammenspiel von Funktion, Fluktuation und Struktur (Prigogine, 1978, S. 781)

4.1.6. Zusammenfassung und Gesamtrahmen

Die dargestellten Charakteristika zeigen, dass die gesamte Küsten- und Meeresregion als komplexes System angesehen werden muss. Es ist offen. Ständig gegenwärtige Temperatur- und Konzentrationsgradienten sowie äußere Kräfte treiben die Dynamik an. Sie drückt sich in Form von Wasser- und Luftströmungen aus und kann gewissermaßen als *Ausgleichsprozess* verstanden werden. Die strömenden Fluide wechselwirken mit der vielfältigen Materie an der Küste und im Ozean, dessen Zusammenspiel neue emergente Systemeigenschaften herbeiführt. Sie sind so komplex, dass lineare Modellierungen nicht genügen. Insbesondere Rückkopplungen sind für das nichtlineare Verhalten der Systeme von zentraler Bedeutung.

Genau an dieser Stelle zeigt sich, dass *Ausgleich* und *Struktur* zwei Seiten ein und derselben Medaille sind. Während der Ausgleichsprozesse vermögen statistische Fluktuationen im Zusammenspiel mit Rückkopplungen Selbstorganisationsprozesse hin zu einer dissipativen Strukturbildung auszulösen. Genau bei diesen Strukturbildungen handelt es sich um all die aufgeführten Phänomene von den Rippeln bis zum Tsunami. Sie stimulieren wegen ihrer strukturellen Eigenschaften unsere Wahrnehmungsprozesse von Mustern in der Natur und werden daher von uns in besonderem Maße erkannt sowie mit charakterisierenden Namen bezeichnet.

Diese zwei Seiten der Medaille zeigen die Notwendigkeit auf, neben Aspekten der Mechanik und Thermodynamik auch die Theorie komplexer Systeme für die angestrebte Elementarisierung heranzuziehen. Denn, wie Bar-Yam (2007) ausführt, zeigen sich die strukturellen Eigenschaften komplexer Systeme auf einer mittleren Zeitskala. Diesbezüglich legen mechanische Betrachtungen den Fokus auf zu kurze und thermodynamische Betrachtungen den Fokus auf zu lange Zeitskalen. Mechanik und Thermodynamik müssen also unter der Perspektive komplexer Systeme gedacht werden.

Nur so können die von den Ausstellungsmacher/innen gewünschten systemischen Eigenschaften der Küsten- und Meeresregion – wie die Sensibilität gegenüber Störungen, bestimmte Interdependenzen und das daraus folgende kontraintuitive Verhalten – physikalisch fundiert betrachtet werden.

4.2. Perspektive der Ausstellungsbesuchenden

Die fachlichen Darstellungen sind als vorläufige Elementarisierungen zu verstehen, denn noch fehlt die Perspektive der Lernenden, die ggf. die fachliche Strukturierung noch zu verändern zwingt, damit sie angemessen ist. Um die Sichtweise der Besuchenden in Ausstellungen zu erheben, bedarf es einer empirischen Studie. Mithilfe einer Reihe von problemzentrierten Interviews nach Witzel (1985) soll daher die Denk- und Erfahrungswelt von Lernenden erkundet werden. Es ist zu betonen, dass es nicht darum geht, defizitorientiert vorzugehen. Die fachliche

Richtigkeit von Wissen und Vorstellungen der Besuchenden kann zwar *eine* Referenz darstellen, aber darf nie die alleinige Referenz sein. Im Erkenntnisinteresse steht das befragte Individuum im Hinblick darauf, wie es seine Vorstellungen als Denkwerkzeuge nutzt, um verschiedene Strömungs- und Strukturphänomene zu entschlüsseln. Im geplanten Interview werden zwei Exponate im Zentrum stehen, die jeweils ein Strömungs- bzw. ein Strukturphänomen darstellen. Beide Exponate dienen als erzählergenerierende Impulse und Anlass, über Strömungs- und Strukturphänomene nachzudenken und zu sprechen. Die Umsetzung dieser empirischen Studie steht noch aus, wird aber zurzeit vorbereitet.

4.3. Didaktische Strukturierung

Die vorgenommene Elementarisierung ist Kern der didaktischen Strukturierung. Didaktische Strukturierung bedeutet im vorliegenden Fall die Formulierung didaktischer Leitlinien für die besagten Ausstellungsmacher/innen. Die Leitlinien fußen auf der Elementarisierung, gehen aber auch darüber hinaus. Sie sollen die fachlichen Grundlagen aufzeigen, aber auch verdeutlichen, inwiefern die fachliche Sicht von derjenigen der Lernenden abweicht bzw. an welchen Stellen, in Bezug auf welche Begriffe und Konzepte beide übereinstimmen. Der Vergleich zwischen fachlicher Sicht und Sicht der Besuchenden ist deswegen zentral, weil er deutlich macht, in welchen Bereichen die Ausstellungsmacher/innen an brauchbarem Vorwissen der Besuchenden anknüpfen können und wo sie entweder den Besuchenden beim Umdeuten ihrer Vorstellungen helfen oder aber die Vorstellungen mit fachlichem Wissen konfrontieren müssen (Duit, 2002).

Die Leitlinien sind damit ein Anreiz für die Ausstellungsmacher/innen, die Sachstrukturen ausgewählter Strömungs- und Strukturphänomene als Basis für die Planung neuer Exponate zu rekonstruieren. Nach der Formulierung dieser Ausstellungsleitlinien sollen sie ebenfalls empirisch untersucht werden. Dazu dienen Experteninterviews (Bogner, Littich & Menz, 2005) zu den Leitlinien, und zwar mit:

- a) FachwissenschaftlerInnen
- b) FachdidaktikerInnen
- c) AusstellungsmacherInnen

Diese drei Personengruppen sind zentrale Akteure im Handlungsfeld von Ausstellungen. Die Fachwissenschaftler/innen sollen bewerten, inwiefern die Leitlinien fachgerecht sind. Fachdidaktiker/innen sollen beurteilen, inwieweit sie an die Bedürfnisse von Lernenden angepasst sind. Und Ausstellungsmacher/innen sollen schließlich entscheiden, ob die Leitlinien zum Zwecke der Ausstellungsgestaltung zielgerecht sind. Auf der Grundlage sämtlicher Rückmeldungen wird der erste Satz von Leitlinien überarbeitet, um sie in Form einer Handreichung den Ausstellungsgestalter/innen zur Verfügung zu stellen.

5. Literatur

- [1] Bartelmann, M., Feuerbacher, B., Krüger, T., Lüst, D., Rebhan, A. & Wipf, A. (2015). *Theoretische Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [2] Bar-Yam, Y. (2003). *Dynamics of Complex Systems*. Boulder, Colorado: Westwing Press.
- [3] Bleichroth, W. (1991). Elementarisierung, das Kernstück der Unterrichtsvorbereitung. *Naturwissenschaft im Unterricht. Physik*, 39, 4-11.
- [4] Bliesmer, K. (2016). *Fachdidaktische Analyse von Bildungsangeboten norddeutscher Meeresforschungsinstitute*. Masterarbeit: Universität Oldenburg.
- [5] Blundell, S. J. & Blundell, K. M. (2010). *Concepts in Thermal Physics*. Oxford: University Press.
- [6] Bogner, A., Littich, B. & Menz, W. (2005). *Das Experteninterview. Theorie, Methode, Anwendung*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- [7] Clausen, S. (2015). *Systemdenken in der außerschulischen Umweltbildung*. Münster: Waxmann.
- [8] Duit, R. (2002). Alltagsvorstellungen und Physik lernen. In E. Kircher & W. Scheider (Hrsg.), *Physikdidaktik in der Praxis* (S. 1-26). Berlin, Heidelberg: Springer.
- [9] 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* (S. 13-37). Rotterdam, Boston, Taipei: Sense Publishers.
- [10] Durst, F. (2006). *Grundlagen der Strömungsmechanik: eine Einführung in die Theorie der Strömung von Fluiden*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [11] Duske, P. (2017). *Bilingualer Unterricht im Fokus der Biologiedidaktik. Auswirkungen von Unterrichtssprache und -kontext auf Motivation und Wissenserwerb*. Berlin, Heidelberg: Springer VS.
- [12] Gladwell, M. (2001). *The Tipping Point. How Little Things Can Make a Big Difference*. London: Abacus.
- [13] Grotzinger, J. & Jordan, T. (2017). *Press/Siever Allgemeine Geologie*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [14] Haken, H. (1991). *Die Selbststrukturierung der Materie. Synergetik in der unbelebten Welt*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- [15] Jacobeit, J. (2007). Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Klimasystem. In W. Endlicher & F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.), *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke* (S. 1-16). Potsdam: Institute for Climate Impact Research.
- [16] Kraume, M. (2012). *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik. Grundlagen und apparative Umsetzungen*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [17] Mainzer, K. (1999). *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [18] Mayring, P. & Prenzel, M. (2011). Research on Interest in Science: Theories, Methods and Findings. *International Journal of Science Education*, 33, 27-50.
- [19] Olah, N. (2011). *Einsteins trojanisches Pferd. Eine thermodynamische Deutung der Quantentheorie*. Wien, New York: Springer.
- [20] Ossimitz, G. & Lapp, C. (2006). *Das Metanoia-Prinzip. Eine Einführung in systemgerechtes Denken und Handeln*. Hildesheim: Franzbecker Verlag.
- [21] Pfeiler, W. (2016). *Experimentalphysik. Band II: Wärme, Nichtlinearität, Relativität*. Berlin, Boston: De Gruyter.
- [22] Prigogine, I. (1978). Time, Structure and Fluctuations. *Science*, 99, 777-785.
- [23] Roskam, A. (2016). *Fachdidaktische Analyse außerschulischer Repräsentationen der (geo-) physikalischen Dynamik im Wattenmeer und an der Küste*. Masterarbeit: Universität Oldenburg.
- [24] Schlichting, H. J. (2000). Von der Dissipation zur Dissipativen Struktur. *Praxis der Naturwissenschaften/Physik*, 49, 12- 16.
- [25] Schlichting, H. J. & Nordmeier, V. (1996). Strukturen im Sand. Kollektives Verhalten und Selbstorganisation bei Granulaten. *MNU*, 49, 323-332.
- [26] Schurz, J. (2006). *Systemdenken in der Naturwissenschaft. Von der Thermodynamik zur Allgemeinen Systemtheorie*. Heidelberg: Carl-Auer-Verlag.
- [27] Sommer (2006). *Untersuchung der Systemkompetenz von Grundschulern im Bereich Biologie*. Dissertation: Universität Kiel.
- [28] Spurk, J. & Aksel, N. (2010). *Strömungslehre. Einführung in die Theorie der Strömungen*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [29] UNESCO World Heritage Committee (2009). *Report of Decisions*, Seville, 22-30 June (WHC-09/33.COM/20).
- [30] Wilde, K. (1978). *Wärme- und Stoffübergang in Strömungen*. Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopf Verlag.
- [31] Witzel, A. (1985). Das problemzentrierte Interview. In G. Jüttemann (Hrsg.), *Qualitative Forschung in der Psychologie: Grundfragen, Verfahrensweisen, Anwendungsfelder* (S. 227-255). Weinheim: Beltz.
- [32] Worthoff, R. & Siemens, W. (2012). *Grundbegriffe der Verfahrenstechnik*. Weinheim: Wiley-VCH.