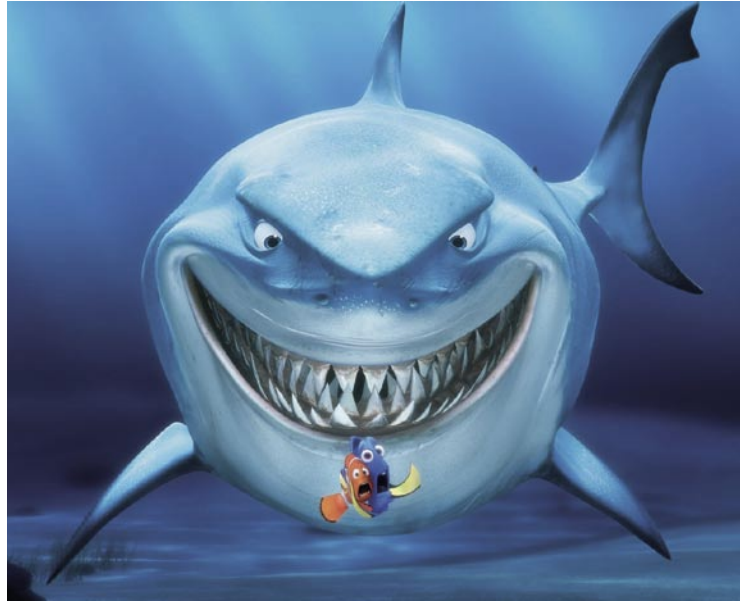


Nahrungsketten im Watt: Fressen und gefressen werden

Von Thilo Gross und Kai W. Wirtz

Das Wattenmeerökosystem ist ein komplexes Gefüge verschiedener Lebewesen und Prozesse. Wir stellen zwei verschiedene Modellierungsstrategien vor, mit denen dieses System untersucht wird – die realistische und die konzeptionelle Modellierung. Unsere Betrachtung zeigt, wie sich diese unterschiedlichen Herangehensweisen ergänzen und sogar vereinen lassen.

The Wadden Sea ecosystem is characterized by the complex interaction of many different species and processes. We describe two modelling approaches which are used to study this system – realistic and conceptual modelling. Our discussion underlines the differences between these approaches. It also shows how they complement each other and even converge to a new way of describing ecosystems.



Das Wechselspiel von Räuber und Beute ist nicht nur im Film "Findet Nemo" spannend, sondern auch bei der Modellierung von Ökosystemen spielt die Beschreibung von Nahrungsnetzen eine besondere Rolle.

Natürliche Ökosysteme basieren auf dem Prinzip des „Fressen-und-gefressen-werdens“. Dem Menschen, der am Ende vieler Nahrungsketten steht, ist dieses Prinzip nur noch von einer Seite her erfahrbar. Die andere Seite wird in Filmen wie Findet Nemo einprägsam in Szene gesetzt: Nemos Mutter und seine Geschwister „verschwinden“ bei einem Barrakuda-Besuch. Solche Animationsfilme wie auch realistische Dokumentationen stellen eindrucksvoll die verschiedenen Strategien dar, mit denen Räuber ihre Nahrung erbeuten und die Beute ihrerseits dem Gefressen-werden zu entkommen versucht. Man denke nur an Fische, die durch Schwarmbildung ihre Jäger verwirren, oder Orka-Wale, die Heringsschwärme zusammentreiben, um die Fische dann mit ihren Schwanzflossen zu erschlagen. Nicht weniger dramatisch geht es auch im Wattenmeer zu.

Nahrungsketten im Wattenmeer

Im Wechselspiel der Gezeiten führen selbst Algen - die Pflanzen der Meere - ein bewegtes Leben. Um wachsen zu können, benötigen sie wie alle Pflanzen Licht und

eine ausreichende Versorgung mit gelösten Nährstoffen. Die Algen werden von Muscheln und Zooplankton, zum Beispiel kleinen Wasserflöhen gefressen. Vom Zooplankton ernähren sich kleine Fische und Fischlarven. Muscheln und kleine Fische selbst stehen wiederum auf dem Speiseplan vieler Seevögel. Eine zweite, vor allem im Wattenmeer wichtige Nahrungsquelle bildet abgestorbenes organisches Material. Durch einen ersten Zersetzungsprozess werden die abgestorbenen Überreste von Tieren und Pflanzen in kleine Partikel, den so genannten Detritus, umgewandelt. Von ihm leben direkt oder indirekt Bakterien, einige Planktonarten und Wattwürmer.

Grob betrachtet ergeben sich im Wattenmeer zwei parallele Nahrungsketten. Die eine Kette beginnt bei den anorganischen Nährstoffen, die andere beim Detritus. Seevögel, räuberische Vögel und Menschen stehen am Ende beider Ketten. Schaut man jedoch genauer hin, ist die Situation viel komplexer. Die verschiedenen Stufen der Nahrungsketten sind nicht nur dicht miteinander verwoben, sondern werden jeweils von Dutzenden verschiedener Arten bevölkert. Diese Arten zeigen teilweise sehr

unterschiedliches Verhalten. Während einige Algen beispielsweise auf gelöste Siliziumverbindungen angewiesen sind, kommen andere weitestgehend ohne diesen Nährstoff aus. Viele Zooplanktonarten fressen nicht nur Algen, sondern auch anderes Zooplankton. Und natürlich ernähren sich auch nicht alle Fische nur von Zooplankton. Es gibt sogar vegetarische Fische, wie zum Beispiel die Meeresche, die den Algenbewuchs auf dem Sediment beweidet. Auf diese Weise ergibt sich ein komplexes Nahrungsnetz. Nicht nur für das Wattenmeer, sondern auch für andere Ökosysteme ist dieses komplexe Gefüge von zentraler Bedeutung. Das Wattenmeer dient vielen Fischarten der Nordsee als Kinderstube. Darüber hinaus nutzen viele Zugvögel das Watt, um sich Energievorräte für ihre langen Reisen anzufressen.

Realistische Modelle

Für die Untersuchung von komplexen Systemen wie dem Nahrungsnetz im Wattenmeer stellen mathematische Modelle neben Laborexperimenten und Messungen im Untersuchungsgebiet ein wichtiges Werkzeug dar. Bei der Modellierung werden die aus Theorie und Experiment bekannten Zusammenhänge in mathematische Gleichungen übersetzt. Dadurch entsteht ein Gleichungssystem, das das Verhalten des natürlichen Systems nachbildet. Anhand dieses mathematischen Modells lassen sich dann weitere Untersuchungen mit relativ geringem Aufwand durchführen. Zum Beispiel können in einem Modell alle Systemvariablen direkt beobachtet werden - also auch diejenigen, die sonst nur schwer zu messen sind. Ein weiterer Vorteil zeigt sich bei der Betrachtung besonderer Szenarien, die in der Natur gar nicht oder nur mit großen Aufwand untersucht werden können. Auf diese Weise werden zum Beispiel im Computer die Auswirkungen von Eiswintern, Stürmen oder Ölunfällen auf das Watt betrachtet.

Zur Untersuchung des Wattenmeers als Gesamtsystem wird eine Modellierungsstrategie eingesetzt, die als realistische Modellierung bezeichnet wird. In realistischen Modellen wird versucht, das natürliche System möglichst genau nachzubilden. Dies führt bei einem System wie dem Nahrungsnetz im Wattenmeer automatisch zu einem sehr komplexen System von mathematischen Gleichungen, deren Formulierung und Einbettung in das mathematische Modell viele Jahre in Anspruch nehmen kann. In



Das Watt ist die Heimat vieler interessanter Lebensformen. Ihre Wechselwirkungen bilden ein komplexes Netzwerk. Die Abbildung zeigt einen Copepoden (Zooplankton) und verschiedene Algen.

den Gleichungen steckt eine Vielzahl von Parametern, die zum Beispiel beschreiben, wie schnell eine Zooplanktonpopulation unter bestimmten Umweltbedingungen wächst. Um die Werte dieser Parameter in der Natur zu bestimmen, ist oft ein erheblicher experimenteller Aufwand erforderlich. Darüber hinaus benötigt ein realistisches Wattmodell weitere Informationen. So hängt die Bewegung des Planktons von der Strömung des Wassers durch das Watt ab. Die Strömungsfelder, die diese Bewegung beschreiben, müssen deshalb zunächst in hydrodynamischen Berechnungen gewonnen werden.

Eine andere Auswirkung der Komplexität realistischer Modelle ist, dass sie beinahe ausschließlich in Simulationen untersucht werden können. Der Ablauf einer Simulation ähnelt dabei einem Experiment. Im Experiment würde man einen bestimmten Eingriff vornehmen, also zum Beispiel zusätzliche Nährstoffe in ein Versuchssystem einbringen und dann die Auswirkungen auf das System für eine gewisse Zeit beobachten. Bei der Simulation ändert man einen entsprechenden Modellparameter (z.B. Nährstoffverfügbar-

keit) und simuliert dann die Entwicklung des Systems über den entsprechenden Zeitraum. Dies geht in der Regel sehr viel schneller als im Experiment. Deshalb können sehr viele Untersuchungen in relativ kurzer Zeit und mit vergleichsweise geringem Aufwand durchgeführt werden.

Komplexe Modelle sind mitunter für Überraschungen gut. Ihre eigentliche Stärke liegt in dem Aufzeigen von unerwarteten Effekten, weniger in der Vorhersage genauer Zahlen (vgl. „Warum Bakterien schlafen“ in diesem Heft). Ein aktuelles Beispiel liefern die Nährstoffkonzentrationen an der Küste. Im Rahmen neuer EU-Qualitätsstandards werden bald neue Grenzwerte gelten. Es können deshalb technische, ökonomische oder gesetzliche Steuerungen erforderlich sein, um den Eintrag von Nährstoffen durch Abwässer und Landwirtschaft zu reduzieren. Um möglichst gezielt Maßnahmen ergreifen zu können, ist eine genaue Kenntnis der Nährstoffdynamik im Watt wünschenswert. Mit Oldenburger Modellen kann gezeigt werden, dass die hohe Nährstoffkonzentration in den flachen Gewässern des Wattenmeeres nicht nur vom Menschen bestimmt wird,

sondern auch durch einen hohen Eintrag aus dem Wattediment.

Konzeptionelle Modelle

Trotz der vielen spannenden Erkenntnisse, die mit realistischen Modellen gewonnen werden, besitzen diese auch Nachteile. Da sie viele Prozesse sehr konkret beschreiben, basieren sie auf einer Vielzahl verschiedener Annahmen. Der Gültigkeitsbereich dieser Annahmen ist in vielen Fällen unklar. Selbst nach sechs Jahren Arbeit der Forschergruppe werden viele Unsicherheiten in den in Oldenburg entwickelten realistischen Modellen verbleiben. Dieses Problem ist nicht nur durch weitere Messkampagnen, internationale Kooperationen oder vermehrten Zugriff auf bestehende Datenbestände zu lösen. Vor allem ist eine intelligente Methodenentwicklung gefragt. Die Untersuchung konzeptioneller Modelle kann hierzu einen Beitrag leisten.

Im Gegensatz zu realistischen Modellen versuchen konzeptionelle Modelle nicht, das Gesamtsystem in allen Details abzubilden. Stattdessen beschreiben sie einzelne, eng umrissene Aspekte, also zum Beispiel bestimmte Teile des Nahrungsnetzes. Im Vergleich mit realistischen Modellen besitzen konzeptionelle Modelle deshalb eine viel geringere Komplexität. Das bedeutet nicht nur, dass das Verhalten von konzeptionellen Modellen leichter zu verstehen ist, sondern dass zur Analyse von konzeptionellen Modellen andere mathematische Methoden zur Verfügung stehen.

Zusätzlich zur Simulation sind an konzeptionellen Modellen auch Untersuchungen mit den Verfahren der Bifurkationstheorie möglich. In Simulationen werden in der Regel nur Systeme betrachtet, in denen die Werte aller Parameter vorgegeben sind. Wenn ein Parameterwert geändert wird, weil neue Daten verfügbar sind oder ein anderes Szenario untersucht werden soll, muss die Simulation vollständig wiederholt werden. Um den realistischen Parameterraum zu erkunden, werden deshalb oft sehr viele Simulationen durchgeführt. Mit den Methoden der Bifurkationstheorie sind hingegen gar keine Simulationen notwendig. An ihre Stelle treten mathematische Berechnungen, in denen die Parameter nicht spezifiziert werden müssen. Das bedeutet, dass die Berechnungen nur einmal durchgeführt werden müssen. Ihr Ergebnis ist für alle möglichen Parameterwerte gültig. Auf diese Weise können Aussagen formuliert werden, die das System mit großer Allgemeinheit beschreiben.

Im Rahmen der Forschergruppe Watt wurde die Allgemeinheit konzeptioneller Modelle noch einen Schritt weitergetrieben. Dazu wurde ein Ansatz entwickelt, der es erlaubt, allgemeine Modelle effizient zu analysieren. In diesen Modellen werden nicht nur die Parameter, sondern auch Teile der Modellgleichungen als Unbekannte behandelt. Ein einziges allgemeines Modell kann auf diese Weise eine große Klasse ähnlicher Systeme beschreiben. Unsicherheiten, die bei der Beschreibung des Systems bestehen, müssen deshalb in allgemeinen Modellen nicht durch häufig relativ willkürliche Annahmen ausgeräumt werden.

Allgemeine Modelle können unter anderem eingesetzt werden, um zu entscheiden, welche biologischen Details in realistischen Modellen berücksichtigt werden sollten. Dies zeigt sich am Beispiel der Nährstoffdynamik. In den meisten konkreten Modellen von Nahrungsketten wirkt eine Erhöhung des Nährstoffeintrags destabilisierend. Aus der Natur ist jedoch bekannt, dass bestimmte Nahrungsketten durch die Zugabe von Nährstoffen stabilisiert werden. In allgemeinen Modellen kann nun untersucht werden, unter welchen Bedingungen eine Destabilisierung beziehungsweise eine Stabilisierung eintritt. Es zeigt sich, dass Nährstoffzugabe immer destabilisierend wirkt, wenn die Wechselwirkung zwischen Arten mit bestimmten mathematischen Funktionen beschrieben wird (Holling-Funktionen). Diese Funktionen werden heute in den meisten konkreten Modellen eingesetzt. Werden jedoch komplexere Funktionen verwendet, die mehr biologische Prozesse berücksichtigen, kann eine Nährstoffzugabe auch stabilisierend wirken. Anhand eines allgemeinen Modells kann entschieden werden, welche Klassen von Prozessen diesen Effekt haben können und deshalb in realistischen Modellen berücksichtigt werden sollten.

Realistisch, konzeptionell oder beides?

In der Forschergruppe Watt werden einerseits realistische Modelle entwickelt, die das Watt als Gesamtsystem beschreiben, aber auf Grund ihrer hohen Komplexität viele Unsicherheiten enthalten. Andererseits werden allgemeine konzeptionelle Modelle betrachtet, die einzelne Teilaspekte in großer Allgemeinheit beleuchten, aber nur einen kleinen Teil des Gesamtsystems erfassen. Diese beiden Ansätze bilden zwei komplementäre Startpunkte auf dem Weg zu einem

gemeinsamen Ziel: ein Modell, das das Wattenmeer als Gesamtsystem beschreibt, aber nur wenige Gleichungen und Parameter enthält. Ein solches Modell würde die Detailtreue von realistischen Modellen mit der Allgemeinheit und Sicherheit von konzeptionellen Modellen in sich vereinen.

Es stellt sich die Frage, ob eine realistische und gleichzeitig konzeptionelle Beschreibung eines Systems von der Komplexität des Wattenmeeres möglich ist. Können zahlreiche, auf verschiedenen Ebenen miteinander verknüpfte Prozesse des Wachstums und der Anpassung überhaupt mit Hilfe weniger Gleichungen und Modellparameter beschrieben werden? Die Antwort auf diese Frage ist in überraschend vielen Fällen „ja“. Eine grundlegende Eigenschaft von komplexen Systemen ist das Auftreten von emergenten Strukturen. Solche Strukturen treten zum Beispiel auf bei der komplizierten Bahnbewegung der Atome der Luft, die uns umgibt. Zusammengenommen führt die komplexe Bewegung zu emergenten Eigenschaften wie Druck und Temperatur, die einfachen Regeln folgen.

Das Wattenmeerökosystem ist viel komplexer als ein Volumen von Gasatomen. Die geschlossene Beschreibung des Systems auf einer emergenten Ebene ist deshalb noch weit entfernt. Eine Besonderheit der Oldenburger Arbeit liegt darin, dass wir uns diesem Ziel von zwei Seiten nähern, und zwar sowohl durch das Aufspüren zentraler Prozesse in realistischen Modellen als auch durch die genaue Betrachtung dieser Prozesse in konzeptionellen Modellen.

Die Autoren



Prof. Dr. Kai W. Wirtz (siehe Seite 30).

Dr. Thilo Gross, von 2001 bis 2004 Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Theoretische Physik/Komplexe Systeme am Institut für Chemie und

Biologie des Meeres (ICBM), studierte Physik an der Universität Oldenburg und an der University of Portsmouth (Großbritannien). 2004 promovierte er in Oldenburg auf dem Gebiet des Einsatzes allgemeiner Modelle in der Populationsdynamik. Sein wissenschaftliches Interesse gilt vor allem methodischen Entwicklungen im Bereich der Theorie dynamischer Systeme und der Anwendung neuer Methoden in der Ökologie und auf anderen Gebieten.