

Wolfgang Weller

Modellierung ökologischer Systeme

1. Einführung

Es verbreitet sich zunehmend die Erkenntnis, dass auf die Menschheit unserer Tage gewaltige Zukunftsaufgaben zukommen, deren Ursprung wesentlich in der demografischen Entwicklung der Bevölkerung, zunehmenden Ressourcenverknappung, der stattfindenden Klimaveränderung und der unvermeidbaren Globalisierung liegt. Die verträgliche Bewältigung dieses absehbaren Wandels stellt vor allem diejenigen, die Verantwortung tragen, vor große Herausforderungen. Dazu bedarf es auch eines Umdenkens und der Neudefinition der Prioritäten. Dementsprechend erfolgt mancherorts bereits eine Umorientierung zugunsten von Technologien und Organisation, die auf das Leben der Menschen gerichtet sind.

Bei der Lösung dieser Aufgaben wird auch eine wesentliche Unterstützung durch die Wissenschaft erwartet. Angesichts der feststellbaren dynamischen Prozesse, wechselseitigen Kausalitätsbeziehungen und vorhandenen Regelungs- und Adaptionsvorgänge scheinen auch die Disziplinen der Automatisierungstechnik und Systemwissenschaft dafür prädestiniert, wirkungsvolle Beiträge zur Lösung unserer Zukunftsprobleme zu leisten. So nimmt es nicht wunder, wenn sich die Aufmerksamkeit dieser Disziplinen neben der weiteren Entwicklung daseinsverbessernder technischer Systeme zunehmend auch den natürlichen Systemen zuwendet. Hier erhofft man sich von dem Studium solcher Prozesse nicht nur Erkenntnisgewinne, sondern vor allem auch Anregungen dafür, wie Prozesse diesbezüglicher Art geeignet beeinflusst werden können. Das Motto lautet also auch hier: „von der Natur lernen“.

Bei einer näheren Betrachtung der natürlichen Systeme zeigt sich, dass es sich hier um eine außerordentlich breit gefächerte Systemkategorie handelt. Neben gemeinsamen Merkmalen, wie große Komplexität und hoher Vernetzungsgrad unterscheiden sich doch die verschiedenen Mitglieder dieser Kategorie in ihren Eigenschaften doch z. T. wesentlich. Einen Eindruck von der Vielgestaltigkeit der Kategorie der natürlichen Systeme vermittelt **Bild 1**.

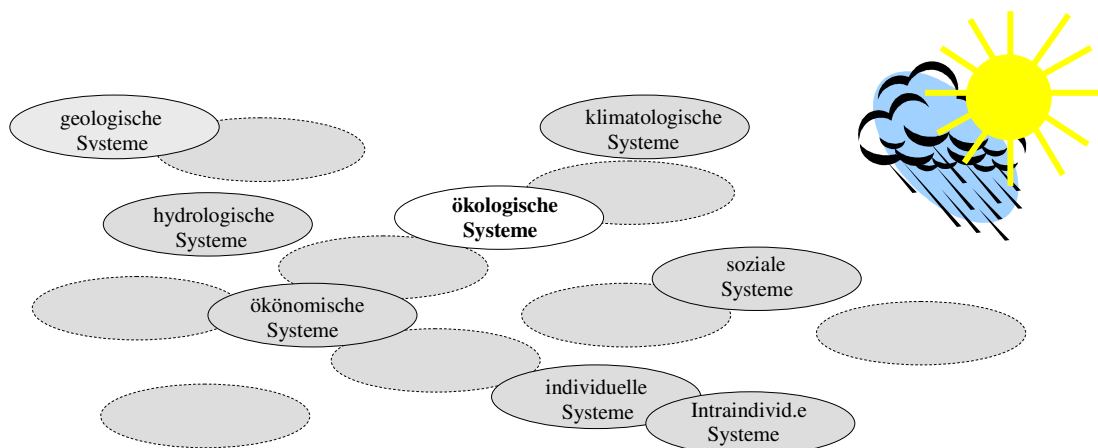


Bild 1 natürliche Systeme im (unvollständigen) Überblick

Aus naheliegenden Gründen werden wir bei der nachfolgenden Behandlung eine Auswahl treffen und uns nur mit den **ökologischen Systemen** befassen.

2. Problemstellung

Die Natur bietet uns mit den ökologischen Systemen ein hervorragendes Beispiel für das dauerhafte Bestehen stabiler Gemeinschaften unterschiedlicher Arten und Tiere auch unter wechselnden äußeren Bedingungen. Hierbei handelt es sich offensichtlich um sog. große Systeme mit einer Vielzahl von Elementen mit spezifischen Eigenschaften unterschiedlicher Art, die untereinander hochgradig vernetzt sind. Diese Systeme streben als Ganzes zur Aufrechterhaltung einer stabilen Gleichgewichtslage trotz wechselnder Umgebungseinwirkungen.

Die Aufklärung der dabei wirkenden Mechanismen verheißt zunächst einen Erkenntnisgewinn bezüglich des Verhaltens solcher komplexen Systeme. Darüber hinaus erwartet man vom Studium natürlicher Systeme auch Hinweise für die Bewältigung der vor uns liegenden großen Zukunftsaufgaben. Dazu wollen wir uns hier im Weiteren um die Entwicklung eines Modells ökologischer Systeme bemühen, welches die grundsätzlich bestehenden Zusammenhänge in vereinfachter Form wiedergibt. Dies geschieht auch in der Erwartung, dass dieser Modelltyp auch für ganz andere Klassen natürlicher Systeme von Relevanz ist. Anhand eines solchen Modells können dann weiterführend Studien durchgeführt werden, die die Auswirkungen verschiedener Eingriffe deutlich machen.

Wie aus diesbezüglichen Voruntersuchungen hervorgeht, ist das Verhalten ökologischer Systeme geprägt durch Prozesse mit Regelungs- und Adaptionscharakter. Ergo scheinen die Disziplinen der Kybernetik, Systemwissenschaft und Automatisierungstechnik dazu berufen, ihren Beitrag zur Entwicklung solcher Modelle zu leisten. Eine nähere Untersuchung zeigt indessen, dass sich die hier betrachteten Systeme gegenüber den klassische, bisher von der Automatisierungstechnik behandelten Systemen in einigen Punkten deutlich unterscheiden. Dies betrifft insbesondere die folgenden Merkmale:

- Hohe Komplexität der Systeme infolge der Vielzahl ihrer Element und deren hochgradiger Verknüpfung.
- Austausch von Materie – zumeist in Form von Nahrung – anstelle von Informationen über die bestehenden Kopplungen.
- Vorliegen einer hierarchischen Struktur mit wechselseitigen Kopplungen
- Eigenaktivität der Individuen (Elemente).
- Selbstanpassung der Individuen.
- Anstreben eigener Zielstellungen der Individuen (Sicherung des eigenen Überlebens).
- Fehlen einer zentralen regelnden Instanz (Regler).
- Fehlen von Führungsgrößen für die einzelnen Regelkreise.

Somit entsteht nun die Frage, inwieweit das methodische Instrumentarium der klassischen Automatisierungstechnik für die Behandlung der betrachteten Systemklasse überhaupt geeignet ist. Dies wird sich jedoch im Verlauf der weiteren Ausführungen klären.

Um etwas Konkretes vor Augen zu heben, soll den weiteren Erörterungen ein typisches Ökosystem zugrunde gelegt werden. Dieses soll sich auf das Zusammenwirken heimischer Pflanzen und Tiere beziehen und wird in **Bild 2** in Form eines Blockschaltbildes veranschaulicht.

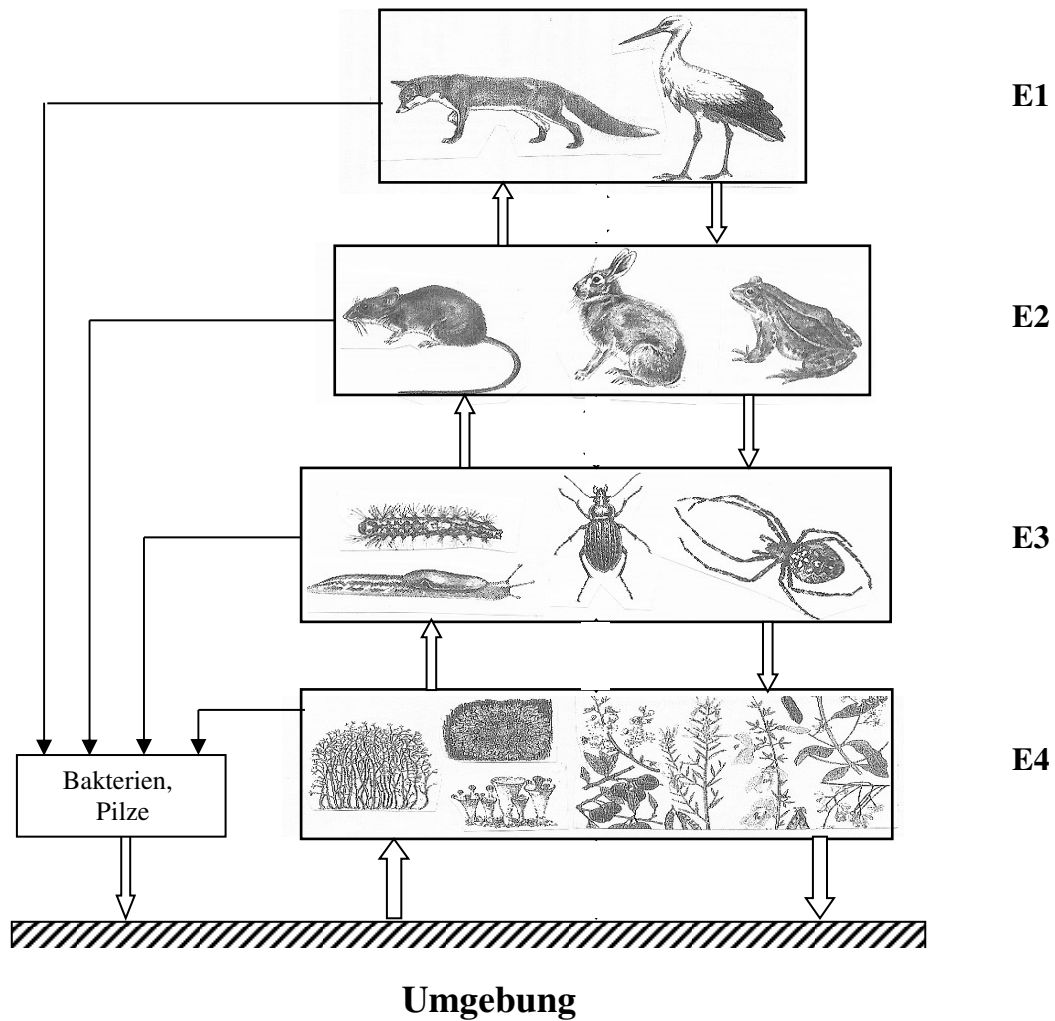


Bild 2 Modell eines beispielhaften Ökosystems

Wie ersichtlich, liegt dem betrachteten Ökosystem eine hierarchische Struktur, bestehend aus 4 Ebenen, zugrunde.

Die untere Ebene E1 stellt die Nahrungsgrundlage in Form eines Angebots von Moosen, Flechten, Pilzen, Beeren, Gräsern usw. bereit. Davon ernähren sich auf Ebene E2 diverse Kleintiere, wie Schnecken, Raupen, Insekten verschiedener Art u. a. Diese verspeisen auf Ebene E3 wiederum Mäuse, Hasen, Frösche und weitere mittelgroße Tiere. Diese werden wiederum auf Ebene E4 von Tieren, wie Füchsen und Störchen, bejagt. Somit bestehen zwischen den Individuen benachbarter Ebenen bestimmte Beziehungen. Diese sind einerseits dadurch bestimmt, dass jede Spezies die für das eigene Überleben und das ihrer Nachkommen notwendige Nahrung aus dem Angebot der darunter liegenden Ebene bezieht. Im Gegenzug führt jedoch gerade die Ausbeutung dieser Nahrungsquelle zu einer Verknappung dieser Ressource. Somit besteht ein Rückkopplungseffekt. Diese wechselweisen Verkopplungen durchziehen sich über sämtliche Ebenen.

Außer den Wechselwirkungen zwischen den benachbarten Ebenen bestehen weitere Rückführungen von jeder Ebene aus zum Boden, welche die Wiederaufführung der Nahrungsausscheidungen und unverdaulichen Reste der abgestorbenen Individuen nach ihrer Zersetzung durch Bakterien und Pilze betreffen.

Das betrachtete Ökosystem unterliegt auch den Einwirkungen seiner Umgebung, welche dann zu Verschiebungen des Gleichgewichtszustandes führen. Diese Einflüsse wurden allerdings ob ihrer

Vielfältigkeit im Blockschaltbild nicht berücksichtigt. Die Ursachen dafür können Naturereignisse, Klimaveränderungen oder auch Eingriffe des Menschen sein, die sich auf die einzelnen Spezies unterschiedlich auswirken. Bei längerer Einwirkungsdauer sind die Individuen in der Lage, sich diesen Änderungen anzupassen, um auch unter den veränderten Bedingungen zu überleben. Diese Adaption wird bei lang dauernden Veränderungen durch die biologische Evolution bewirkt. Es gibt aber auch Mechanismen der kurzfristigeren Angleichung. So entscheiden sich beispielsweise bestimmte Zugvögelarten im Zeichen des sich derzeit beschleunigenden Klimawandels zu einem immer vorzeitiger verlegten Aufbruch aus ihren Winterquartieren, um die günstigsten Brut- und Aufzuchtbedingungen für ihren Nachwuchs zu erlangen. Umgebungseinflüssen kurzfristigerer Art, wie verregneten oder auch zu trockenen Sommern, haben die Spezies hingegen meist wenig entgegen zu setzen, so dass hier mit einer erhöhten Verlustrate zu rechnen ist. Besonders nachhaltig wirken sich die vom Menschen häufig aus Unachtsamkeit oder Gewinnsucht verursachten Eingriffe in die Umgebung von Ökosystemen aus, die nicht nur einzelne Spezies bedrohen, sondern ganze Ökosysteme in Gefahr bringen können.

3. Definition eines vereinfachten Ökosystems

Nach den vorstehenden, eher biologisch orientierten Erörterungen wollen wir uns nun dem Versuch einer funktionellen Beschreibung widmen. Dafür ist es notwendig, das bisher betrachtete Beispiel eines Ökosystems nochmals zu vereinfachen. Die hauptsächliche Maßnahme dazu besteht in der Zulassung nur jeweils einer Spezies auf jeder Ebene, deren Zusammenspiel nun untersucht wird. Außerdem werden wir hier von der Berücksichtigung von Umwelteinflüssen absehen. Falls es gelingt, für dieses stark reduzierte System ein Modell aufzustellen, werden wir an späterer Stelle noch bestimmte Nachbesserungen vorschlagen.

Im Sinne der hier vorgesehenen Beschränkungen sollen auf jeder Ebene folgende Spezies berücksichtigt werden und zugleich die Mächtigkeit ihrer aktuellen Population mit geeigneten Variablen benannt werden:

- Ebene **E1**: Pflanzen, Populationsgröße p
- Ebene **E2**: Mücken, Populationsgröße m
- Ebene **E3**: Frösche, Populationsgröße f
- Ebene **E4**: Störche, Populationsgröße s

4. Modellansatz

Für den vorgesehenen Modellansatz wollen wir folgende Vorschläge unterbreiten:

- (1) Die aktuelle Größe einer Population pop bzw. Mächtigkeit einer Nahrungsquelle soll durch ein Speichermodell erfasst werden, dessen entgegen gerichtete Eingänge zu und ab sind. (**Bild 3**).

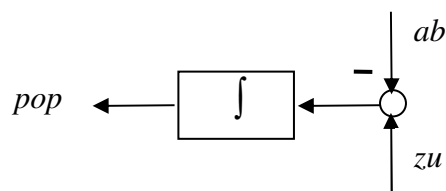


Bild 3 Speichermodell

Darin bedeutet \int den Integrationsoperator. Die Ausgangsgröße pop des Modells ist die Zustandsvariable des Speichers.

- (2) Zur Berücksichtigung der bestehenden Zeitverzögerungen werden Verzögerungsglieder angesetzt, deren dynamische Funktion formal durch den Operator Φ gekennzeichnet werden soll. Diese Verzögerungsglieder werden gemäß **Bild 3** zwischen die Differenzeingänge und der deren integraler Verarbeitung im Speichermodul angeordnet.

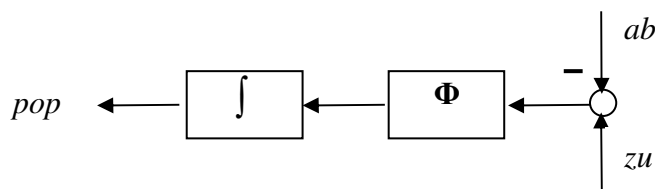


Bild 4 Speichermodell mit zwischengeschaltetem Verzögerungsglied

- (3) Wir müssen noch berücksichtigen, dass zwischen dem Nahrungsbedarf einer Spezies, beispielsweise von Fröschen, und der Nahrungsquelle, hier der Mücken, eine bestimmte Relation besteht. Dies soll durch einen Faktor k erfasst werden, mit dem die Population pop der unterlagerten Ebene multipliziert wird (**Bild 5**).

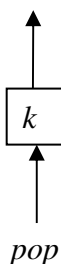


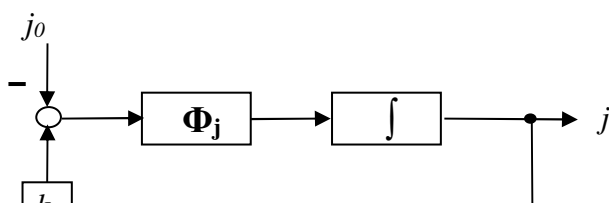
Bild 5 Relation zwischen Nahrungsangebot und -entnahme

Nach diesen Vorbereitungen wollen wir an die Aufstellung eines Modells für das vereinfachte Ökosystem gehen. Dazu werden aus Gründen der Einfachheit zunächst lineare Ansätze benutzt. Außerdem sollen nur die grundlegenden Zusammenhänge berücksichtigt werden.

5. Entwurf des Modellkerns

Kernstück des folgenden Modellansatzes ist die bereits geäußerte Überlegung, dass sich die Population einer Spezies vergrößert, wenn sich das verfügbare Nahrungsangebot verbessert, also die Größe der Population auf der unterlagerten Ebene ebenfalls zunimmt. Die Ausbeutung dieser Nahrungsquelle führt dann allerdings zu einer Dezimierung dieser Population und damit zur Verknappung des Nahrungsangebots für die nächst höhere Spezies.

Das geschilderte Wechselspiel von Fressen und Gefressenwerden wollen wir zunächst in einem 2-Ebenen-Modell fixieren. Die Mächtigkeit der beiden Populationen seien hierzu mit i und j bezeichnet. Bei dieser Modellaufstellung können wir auf die im vorigen Abschnitt eingeführten Ansätze zurückgreifen. Die grafische Umsetzung unserer Überlegungen führt dann auf das in **Bild 6** dargestellte Blockschaltbild.



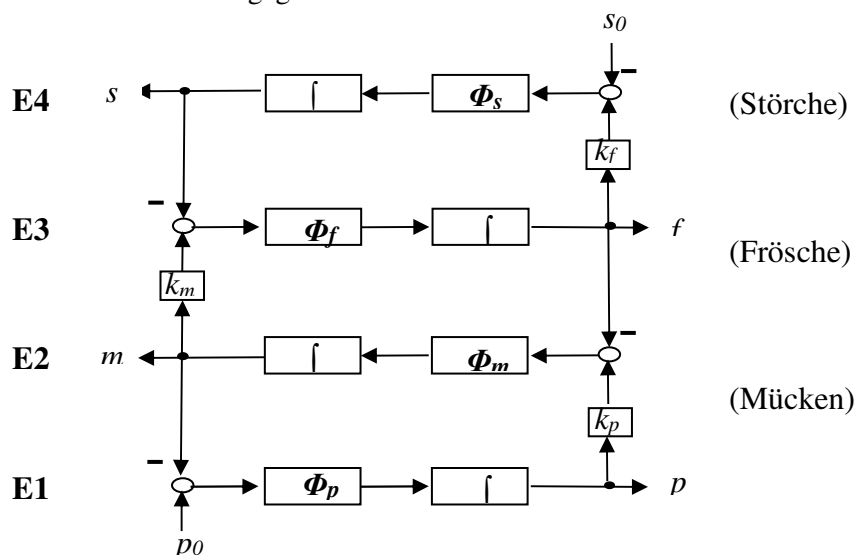
i_0 **Bild 6** Grundstruktur eines 2-Ebenen-Modells

Um satt zu werden, bezieht die Population j das k -fache aus der Population i . Gleichzeitig wird ihr selbst eine Nahrungsmenge j_0 entnommen. Im Gegenzug reduziert sich mit der Verzögerung Φ_i die Population i , bekommt aber den Nachschub i_0 zugeführt. Somit besteht eine Gegenkopplung im Sinne von *negative feedback*.

6. Entwurf des Gesamtmodells

Anhand des vorgestellten Modellkerns ist es nun relativ einfach, das Modell auf die 4 Ebenen unseres vereinfachten ökologischen Systems aufzurüsten. Dazu ersetzen wir die vorübergehend benutzten Symbole i und j für die Populationen benachbarter Ebenen nunmehr durch die Variablen p (Pflanzen), m (Mücken), f (Frösche) und s (Störche). Weiterhin bezeichnen p_0 die vom Boden gelieferte Nahrungsgrundlage und s_0 die auftretenden Verluste der Störche, etwa infolge von Umwelteinwirkungen. Weiterhin seien die unterschiedlichen Dynamiken seien mit Φ_p , Φ_m , Φ_f , und Φ_s bezeichnet. Eine entsprechende Bezeichnung gelte mit k_p , k_m und k_f für die Relationen zwischen den Ebenen.

Nach diesen Erläuterungen kann das Gesamtmodell des vereinfachten Ökosystems vorgestellt werden, welches durch **Bild 7** wiedergegeben wird.

**Bild 7** Grundmodell eines vereinfachten Ökosystems

Die Anordnung lässt drei miteinander verkoppelte Rückführkreise erkennen. Wie zu erwarten war, ist innerhalb dieses Systems alles mit allem verkoppelt. Jede Änderung an einer Stelle wirkt sich somit überall aus.

Die Funktionsbeschreibung derart verkoppelter Systeme gelingt wohl nur, wenn elementare Terme benutzt werden. Dazu wollen wir auf einfache WENN . . . DANN . . . –Regeln zurückgreifen, wie sie für die Beschreibung von Fuzzy-Systemen üblich sind. Die Gesamtbeschreibung wird dann durch den Regelsatz gebildet.

Entsprechend der genannten Beschreibungsform soll nachfolgend der Regelsatz für das in **Bild 6** angegebene Beispielmodell in verbaler (linguistischer) Form angegeben werden:

WENN gutes Nahrungsangebot DANN viele Pflanzen

WENN viele Pflanzen DANN viele Mücken

WENN viele Mücken DANN weniger Pflanzen

WENN viele Mücken DANN viele Frösche

WENN viele Frösche DANN weniger Mücken

WENN viele Frösche DANN viele Störche

WENN viele Störche DANN weniger Frösche

WENN schlechtes Nahrungsangebot DANN weniger Störche

7. Modellaufrüstung

An dem vorgestellten Grundmodell können bedarfsweise noch verschiedene Verfeinerungen vorgenommen werden, die ein realistischeres Abbild unseres Ökosystems geben. Dabei sollen folgende Effekte berücksichtigt werden:

(1) Einfügung von Nichtlinearitäten

Das bisher verwendete lineare Modell wird das Verhalten nur in einem beschränkten Arbeitsbereich hinreichend wiedergeben. In Wahrheit wirken z. T. beachtliche Nichtlinearitäten. Eine Nichtlinearität ist beispielsweise wirksam, wenn sich das Nahrungsangebot auf der unterlagerten Ebene verknappt. Die Jäger müssen nun viel größere Anstrengungen auf sich nehmen, um ihren Bedarf zu decken. Folglich verlangsamt sich die Reduktion der Population der Gejagten. Eine einfache Art der Berücksichtigung dieses Effekts besteht in der Einfügung einer Nichtlinearität in den Rückkopplungs Zweigen.

(2) Berücksichtigung von Reproduktionen

Alle Individuen – gleich, ob Jäger oder Gejagte – reproduzieren sich durch die Geburt von Nachkommen. Der Nachwuchs vergrößert die Population. Dieser Effekt lässt sich durch einen artspezifischen Reproduktionsfaktor $r(i)$, $i=1, 2, \dots$ berücksichtigen, mit dem die betreffende Population multipliziert wird. Dieser Anteil ist ggf. mit einer Verzögerung der Population hinzuzufügen. Auf ähnliche Weise kann auch ein Sterbefaktor eingeführt werden (hier Einkopplung mit negativem Vorzeichen), falls nicht davon ausgegangen wird, dass die meisten Tiere ohnehin vorzeitig den Jägern zum Opfer fallen und somit bereits im Modell erfasst sind.

(3) Berücksichtigung von Nahrungskonkurrenten

In realen Ökosystemen sind die vorhandenen Populationen keineswegs nur Nahrungsquelle einer einzigen Spezies. Wie jeder wohl schon beobachtet hat, werden Mücken keineswegs nur von Fröschen, sondern auch von vielen anderen Tieren, insbesondere Vögeln, verspeist. Folglich müssen sich die Frösche ihre Nahrung mit anderen Spezies teilen. Umgekehrt

ernähren sich ja Frösche nicht ausschließlich von Mücken, sondern auch von vielen anderen Kleinlebewesen. Sofern sich diese Nahrungsaufteilungen nicht wechselseitig kompensieren, können diese Effekte durch artspezifische Verlustraten $c(i) < 1$, $i=1, 2, \dots$ bzw. Gewinnraten $d(i) < 1$, $i=1, 2, \dots$ berücksichtigt werden. Die mit diesen Faktoren multiplizierten Populationsgrößen werden dann, versehen mit den entsprechenden Vorzeichen, in die Gesamtbilanz mit aufgenommen.

(4) Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen

Die Einflüsse aus der Umgebung können prinzipiell auf jeder Ebene auftreten und bezüglich der Größe der jeweiligen Population begünstigend oder behindernd sein. Diese Effekte sind nicht einfach zu erfassen, besonders wenn sich die Spezies daran anpassen. Für überschlägige Analysen genügt möglicherweise der Ansatz eines additiven Terms, der an der Vergleichsstelle vor dem jeweiligen Dynamikglied angreift.

Die Einarbeitung der vorstehend genannten Effekte – und möglicherweise weiterer – ermöglicht eine Verfeinerung des entwickelten Grundmodells, erhöht allerdings auch seine Komplexität in u. U. beträchtlichem Maße. Eine weitere Folge davon ist, dass dann auch immer mehr Parameter bestimmt bzw. geschätzt werden müssen. Daher sollte es der Entscheidung des Anwenders überlassen bleiben, welchen Grad an Detailtreue das Modell aufweisen soll.

8. Anwendungen

Es sollen noch einige Ausführungen zur Verwendung des vorgestellten Modells folgen.

Die Aufklärung des Zusammenwirkens der wesentlichen Kräfte in – wenn auch stark vereinfachten – Ökosystemen liefert einen Beitrag zum allgemeinen Erkenntnisgewinn und bedeutet somit einen Wert an sich („how it works“). Darüber hinaus eröffnen sich aber zahlreiche Anwendungen für das entwickelte Ökomodell.

Zunächst lässt sich das Modell wohl unmittelbar auf andere Biotope – etwa Korallenriffe – übertragen. Vielfältige Einsatzmöglichkeiten sind auch in anderen Systemklassen erkennbar, die in ähnlicher Weise strukturiert sind. Zu diesen zählen in erster Linie ökonomische und finanzielle Systeme. Dies lässt sich etwa durch ein Wirtschaftssystem illustrieren, dessen Zweck darin besteht, eine Gruppe von Menschen mit Brot zu versorgen. Die Äquivalenzen sind sofort erkennbar, wenn man die im Grundmodell von **Bild 7** verwendeten Bezeichnungen von Pflanzen p durch Getreide, die Mücken m durch Mehl, die Frösche f durch Brot und die Störche s durch Menschen substituiert. Somit gewinnt man bereits ein vereinfachtes Abbild der bestehenden Relationen. Die Modelle können allerdings auch wesentlich komplexer werden, wenn innerhalb eines ökonomischen Systems mehrere Komponenten zusammenwirken. Ein solches Beispiel wäre die Modellierung eines Wirtschaftssystems, innerhalb dessen aus verschiedenen Rohstoffen, wie Kautschuk, Stahl, Leichtmetall und Kunststoffen, in mehreren Stufen Automobile entstehen. Große Erwartungen bestehen auch hinsichtlich des Einsatzes solcher Ökomodelle im Zusammenhang mit der Bewältigung der vor uns liegenden großen Zukunftsaufgaben globalen Ausmaßes. Hier würden selbst einfache Modelle möglicherweise wertvolle Aussagen über die Auswirkungen vorgesehener Einflussnahmen liefern.

Der praktische Nutzen des hier vorgestellten Ökomodells realisiert sich hauptsächlich in Simulationsexperimenten, die vorzugsweise auf Digitalrechnern ausgeführt werden. Dazu müssen die Modelle in ein Simulationsprogramm übertragen werden, welches in ein Simulationssystem mit geeigneten Mensch-Maschine-Schnittstellen eingebettet ist. Da die Modellexperimente auf quantitativer Basis erfolgen, müssen die darin enthaltenen Parameter vorab bestimmt oder zumindest abgeschätzt werden. Die Experimente finden somit auf virtueller Ebene statt, was mit beträchtlichen Vorteilen verbunden ist. Die besonderen Vorzüge von Simulationsexperimenten bestehen darin, dass mit den Modellen freizügig umgegangen werden kann und Änderungen sehr einfach möglich sind. Dabei können bestimmte Szenarien durchgespielt und die Wirkungen verschiedener Einflussfaktoren

(„Stellknöpfe“) isoliert voneinander studiert werden. Auf diese Weise lassen sich Einsichten in die Wirkzusammenhänge komplexer Systeme gewinnen.

9. Abschluss

Die vorstehenden Ausführungen zur Modellbildung ökologischer Systeme sollen als ein erster Schritt verstanden werden, die dort bestehenden und schwer zu überschauenden Wirkzusammenhänge solcher komplexer Systeme aufzuklären. Dazu wurde ein – wenn auch stark vereinfachtes – Grundmodell vorgestellt, welches nach den gegebenen Hinweisen ggf. verfeinert werden kann. Zu seiner Bestätigung bedarf es noch der Validierung und Verifikation.

Gelingt dies in hinreichendem Maß, so eröffnen sich zahlreiche Einsatzmöglichkeiten insbesondere auch in anderen Systemkategorien. Besonderer Nutzen entsteht bei einer Verwendung in Simulationsexperimenten. Hier kann vorab getestet werden, wie sich veränderte Rahmenbedingungen (bspw. Umgebungseinflüsse) und auch bestimmte Maßnahmen (Eingriffe) auf das Systemverhalten auswirken. Dafür genügt oftmals die Benutzung solch einfacher und somit leichter handhabbarer Modelle. Auf diese Weise ließe sich das derzeit übliche, mit dem Zauberwort „Reformen“ verbrämte Probieren auf eine solidere Basis stellen. Dies wiederum würde voraussetzen, dass Kybernetiker und Systemwissenschaftler verstärkt in die Entscheidungsprozesse der Politik, Wirtschaft und Finanzwelt einbezogen werden müssten.