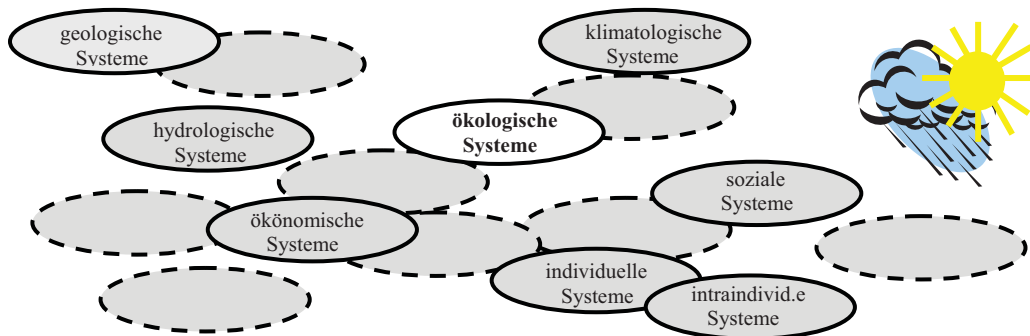


## 1. Einführung

Nach einer Zeit des dominierenden Interesses an technischen Systemen, welche uns beträchtliche Verbesserungen unseres Daseins beschert hat, vermerken wir eine verstärkte Zuwendung zu den *natürlichen* Systemen. Hierfür gibt es verschiedene Gründe, zu denen sicherlich die anstehende Klimaerwärmung, die immer sichtbarer werden Folgen des Umgangs des Menschen mit der Natur, das anscheinend ungebremste Wachstum der Erdbevölkerung und auch die unumkehrbare Globalisierung zählen. Zur Bewältigung dieser vor uns stehenden Menschheitsprobleme wird auch eine Unterstützung von Seiten der Wissenschaft erwartet. Hier sind auch die Automatisierungstechnik und Systemwissenschaft aufgefordert, wirkungsvolle Beiträge zur Lösung unserer Zukunftsprobleme zu leisten. Dabei ist zunächst zu klären, inwieweit die in diesen Disziplinen bisher entwickelten Methoden und Verfahren zur Behandlung natürlicher Systeme tauglich sind.

Zunächst aber ist zu konstatieren, dass die Natur auch schon in Zeiten der Orientierung auf technische Anwendungen durchaus als Vorbild diente, um von den dort entwickelten Verfahren zum Nutzen technischer Automatisierungssysteme zu lernen. Ein bekanntes Beispiel ist die Entschlüsselung evolutionsstrategischer bzw. genetischer Mechanismen, um daraus effektive Optimierungsverfahren zu entwickeln. Auch die Umsetzung neuronaler Funktionen und Strukturen führte zu interessanten Anwendungen in der Automatisierungstechnik. Man nahm auch Anleihe an den vom Menschen genutzten, sprachlich (linguistisch) formulierten Anweisungen, woraus die Theorie der unscharfen Mengen (fuzzy set theory) entstand. Davon profitierte auch die Automatisierungstechnik, indem man daraus anwendernahes Beschreibungsmittel ableitete und auch unkonventionelle Steuereinrichtungen entwickelte.

Die *natürlichen* Systeme umgeben uns in ungeheurer Vielfalt. Neben gemeinsamen Merkmalen, wie große Komplexität und hoher Vernetzungsgrad unterscheiden sich 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. Die Aufklärung der dabei wirkenden Mechanismen verheißt zunächst einen Erkenntnisgewinn bezüglich des Zusammenwirkens in solchen komplexen Systemen. 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.

Den Ansatz für unsere Betrachtungen liefert die Erkenntnis, dass sowohl die Lebensfunktionen biologischer Individuen als auch ihr Zusammenleben in kooperierenden oder auch konkurrierenden Gemeinschaften auf dynamischen Prozessen basieren, die durch interne oder externe Mechanismen gesteuert bzw. geregelt werden, deren Bestandteile untereinander kommunizieren und welche auch fähig sind, sich an veränderte äußere Bedingungen zu adaptieren. Dies entspricht durchaus Prinzipien der Automatisierung. Solche Gemeinsamkeiten in äußerst verschiedenen Erscheinungsformen erkannt

zu haben, ist das große Verdienst von *N. Wiener*. Mit seinem epochalen Werk: „Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine“ hat er den Anstoß zur Gründung einer neuen Disziplin mit Querschnittscharakter – der Kybernetik – gegeben.

## 2. Systembeschreibung

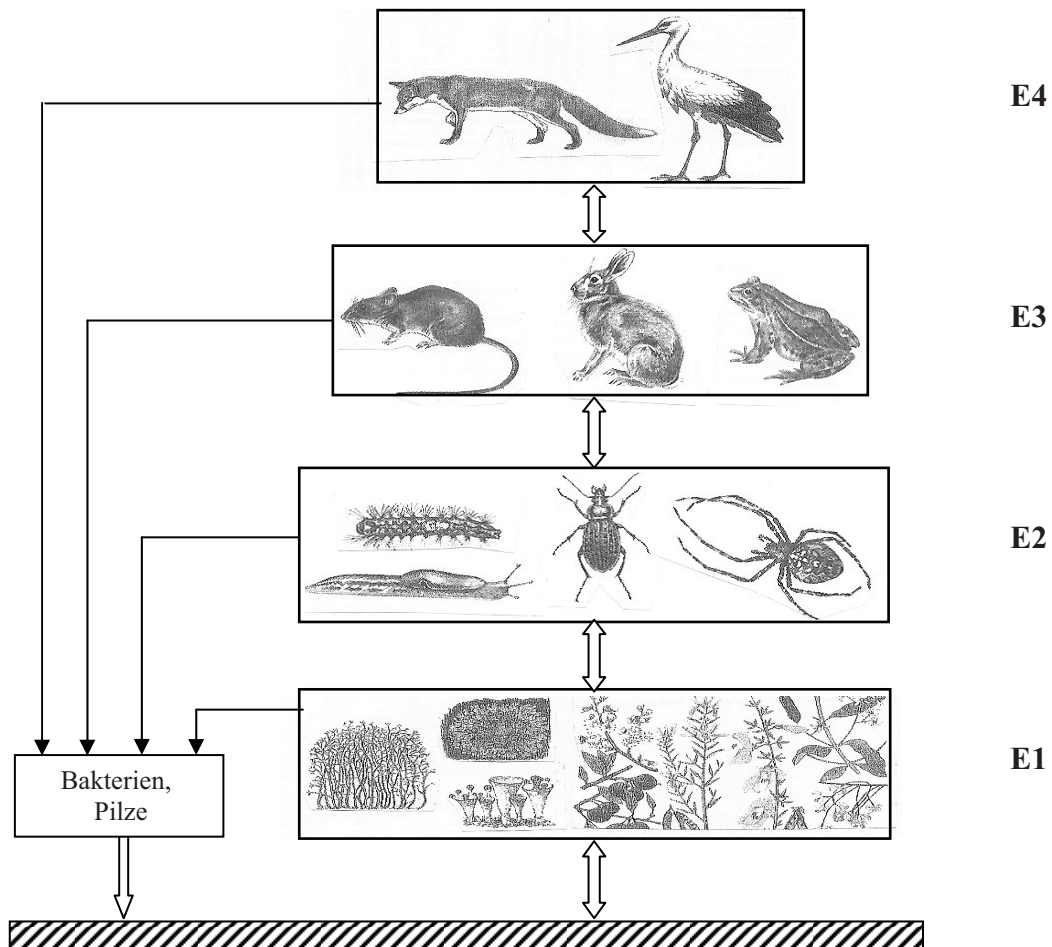
Mit den ökologischen Systemen bietet uns die Natur ein hervorragendes Beispiel für das dauerhafte Bestehen stabiler Gemeinschaften unterschiedlicher Arten von Individuen auch unter wechselhaften äußeren Bedingungen. Hierbei handelt es sich offensichtlich um sog. große Systeme mit einer Vielzahl von Elementen mit spezifischen Eigenschaften unterschiedlicher Art, die in einem Wirkungsgeflecht untereinander in Beziehung stehen. Systeme dieser Art streben als Ganzes die Aufrechterhaltung einer stabilen Gleichgewichtslage an, welche sie auch unter wechselnden Umgebungseinwirkungen wieder zu erreichen suchen.

Das Verhalten ökologischer Systeme ist weitgehend durch Prozesse mit Regelungs- und Adaptionscharakter geprägt. Nähere Untersuchungen zeigen indessen, dass sich die hier betrachteten Systeme gegenüber den klassischen, bisher von der Automatisierungstechnik behandelten Systeme in einigen Punkten deutlich unterscheiden. Dies betrifft insbesondere die folgenden Merkmale:

- hohe Komplexität der Systeme infolge der Vielzahl ihrer Elemente und deren hochgradiger Verknüpfung.
- über die bestehenden Kopplungen erfolgt ein Austausch von Materie – zumeist in Form von Nahrung – anstelle von Informationen.
- die Systeme besitzen eine hierarchische Struktur und sind wegen der wechselseitigen Kopplungen stark vernetzt.
- das Verhalten der Individuen (Elemente) ist wesentlich durch Eigenaktivität geprägt.
- die Individuen streben eine eigene Zielstellung an (Sicherung des eigenen Überlebens).
- die Individuen verfügen über die Fähigkeit der Selbstanpassung.
- es gibt keine zentrale regelnde Instanz (Regler).
- die einzelnen Regelkreise erhalten keine Führungsgrößen.

Somit entsteht nun die Frage, inwieweit das methodische Instrumentarium der klassischen Automatisierungstechnik für die Behandlung der betrachteten Systemklasse geeignet ist.

Um etwas Konkretes vor Augen zu haben, soll den weiteren Erörterungen ein typisches Ökosystem zugrunde gelegt werden, welches sich auf das Zusammenwirken heimischer Pflanzen und mehrerer landlebender Tierarten bezieht. Die konkrete Ausstattung dieses Ökosystems ist **Bild 2** zu entnehmen.



**Bild 2** Modell des betrachteten Ökosystems

Wie ersichtlich, besitzt das untersuchte Ökosystem eine hierarchische Struktur, bestehend aus 4 Ebenen.

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. Auf Ebene **E4** wiederum werden diese Tiere von Füchsen und Störchen bejagt. Somit bestehen zwischen den Individuen jeweils benachbarter Ebenen bestimmte Beziehungen, die durch die jeweilige Ernährung bestimmt sind. Diese resultieren aus der individuellen Zielstellung, welche durch den inneren Zwang zum Überleben bestimmt ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ausbeutung einer Nahrungsquelle zu einer Verknappung dieser Ressource führt. Auf diese Weise ergibt sich ein Rückkopplungseffekt. Diese wechselweisen Verkopplungen durchziehen sämtliche Ebenen.

Außer den beschriebenen Wechselwirkungen zwischen den benachbarten Ebenen bestehen weitere Rückführungen zwischen jeder Ebene und dem Boden. Diese sind dadurch bestimmt, dass Nahrungsausscheidungen und unverdaute Reste der abgestorbenen Individuen nach ihrer Zersetzung durch Bakterien und Pilze wieder der Bodenfruchtbarkeit und damit dem Nahrungsreichtum auf dieser Ebene zugute kommen.

Das betrachtete Ökosystem unterliegt auch den Einwirkungen seiner *Umgebung*, welche zu Verschiebungen des Gleichgewichtszustandes führen. Die Ursachen dafür können Naturereignisse, Klimaveränderungen oder auch Eingriffe des Menschen sein, die sich auf die einzelnen Spezies unterschiedlich auswirken können. Besonders nachhaltig sind die vom Menschen häufig aus

Unachtsamkeit oder Gewinnsucht verursachten Eingriffe in die Umgebung von Ökosystemen, die nicht nur einzelne Spezies bedrohen, sondern ganze Ökosysteme in Gefahr bringen können.

Die Individuen sind dank ihrer Adaptionfähigkeit innerhalb eines weit gesteckten Rahmens in der Lage, sich den Änderungen ihrer Umgebung anzupassen, um auch unter den veränderten Bedingungen zu überleben. Verschiedene Tierarten verfügen über Mechanismen zur kurzfristigeren Angleichung. So entscheiden sich beispielsweise bestimmte Zugvögelarten im Zeichen des sich derzeit beschleunigenden Klimawandels zu einem immer früher 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. Bei lang dauernden Veränderungen der Umwelt wird die Anpassung evolutiv verankert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden diese Effekte hier allerdings nicht gesondert berücksichtigt.

### 3. Definition eines vereinfachten Ökosystems

Nach den vorstehenden, eher biologisch orientierten Erörterungen wollen wir uns nun der funktionellen Beschreibung eines Ökosystems widmen. Dafür ist es notwendig, das betrachtete Beispiel nochmals zu vereinfachen. Dazu werden wir nur jeweils eine Spezies pro Ebene berücksichtigen und deren Zusammenspiel untersuchen. Außerdem werden wir hier von der Berücksichtigung von Umwelteinflüssen absehen. An späterer Stelle werden wir dann für dieses stark reduzierte System noch einige Nachbesserungen vornehmen.

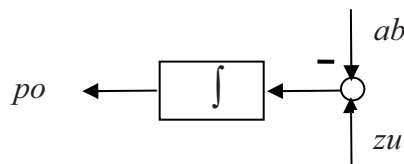
Im Sinne der vorgesehenen Beschränkungen sollen auf jeder Ebene folgende Spezies berücksichtigt werden und zugleich die Mächtigkeit ihrer aktuellen Population mit geeigneten Variablen benannt werden:

- 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**).

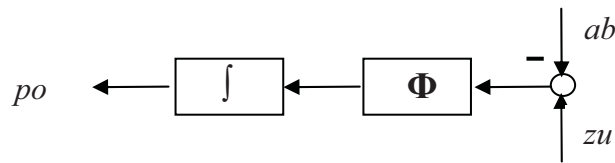


**Bild 3** Speichermodell

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

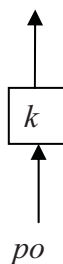
- (2) Zur Berücksichtigung der bestehenden Zeitverzögerungen werden Verzögerungsglieder angesetzt, deren dynamische Funktion formal durch den Operator  $\Phi$  gekennzeichnet werden soll. Diese

Verzögerungsglieder werden gemäß **Bild 3** zwischen die Differenzeingänge und 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**).



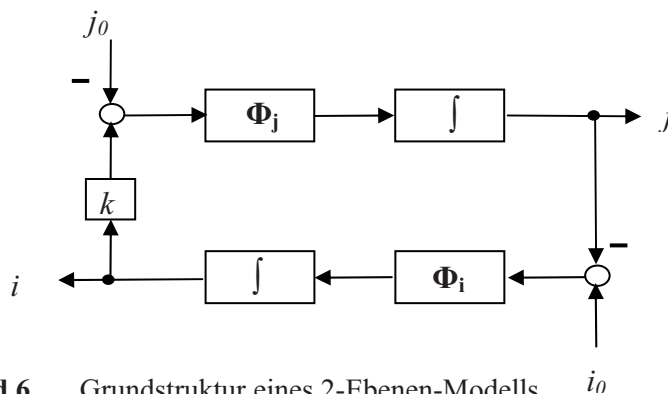
**Bild 5** Relation zwischen Nahrungsangebot und -entnahme

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 allerdings auch 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.



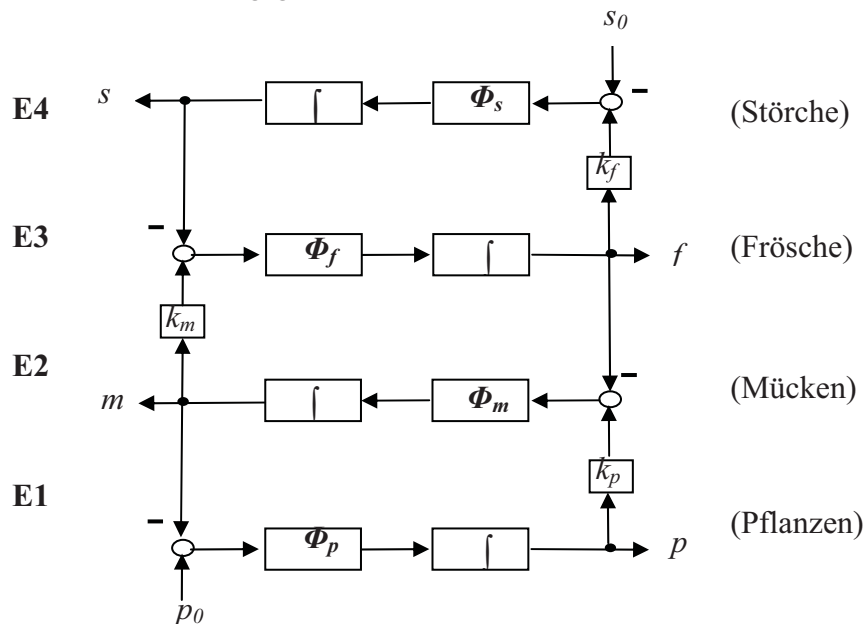
**Bild 6** Grundstruktur eines 2-Ebenen-Modells

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  $\Phi_i$  die Population  $i$ , bekommt aber den Nachschub  $i_0$  zugeführt. Somit besteht eine Gegenkopplung im Sinne von *negative feedback*.

## 6. Entwurf des Gesamtmodells

Der vorliegende Modellkern bietet nun die Grundlage zur Entwicklung einer Beschreibung des betrachteten 4 Ebenen-Systems. 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 mit  $\Phi_p$ ,  $\Phi_m$ ,  $\Phi_f$  und  $\Phi_s$  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.

Eine grobe Funktionsbeschreibung derart verkoppelter Systeme soll nachfolgend unter Benutzung elementarer Terme gegeben 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. Der Regelsatz für das in **Bild 6** angegebene Beispielmodell lautet dann in verbaler (linguistischer) Form:

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 viele Störche DANN weniger Frösche

## 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 genau wiedergeben. In Wahrheit wirken z. T. beachtliche Nichtlinearitäten. Eine Nichtlinearität resultiert beispielsweise aus der Verknappung des Nahrungsangebots auf unterlagerter Ebene. Die Jäger müssen nun viel größere Anstrengungen auf sich nehmen, um ihren Bedarf zu decken. Folglich verlangsamt sich die Reduktion der Population der Gejagten. Dieser Effekt lässt sich durch Einfügung einer Nichtlinearität in den Rückkopplungszweigen berücksichtigen.

### (2) Berücksichtigung von Reproduktionen

Alle Individuen – gleich, ob Jäger oder Gejagte – reproduzieren sich durch die Geburt von Nachkommen. Dieser 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 beispielsweise Mücken nicht nur von Fröschen, sondern auch von anderen Tierarten, 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 („how it works“) und bedeutet somit einen Wert an sich.

Für das entwickelte Modell von Ökosystemen zeichnen sich verschiedene Nutzenanwendungen ab. So lässt sich das Modell wohl unmittelbar auf andere Biotope – etwa Korallenriffe – übertragen. Vielfältige Einsatzmöglichkeiten sind auch für andere Systemklassen, die in ähnlicher Weise strukturiert sind, erkennbar. Zu diesen zählen in erster Linie ökonomische und finanzielle Systeme. Dies lässt sich etwa am Beispiel von Wirtschaftssystemen verdeutlichen, deren 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.

Der hier eröffnete Lösungsweg bietet auch Anregungen für Anwendungen auf andere Kategorien natürlicher Systeme (s. **Bild 1**). Auf diese Weise könnte so schrittweise eine Wissensbank entstehen, die auch für die Lösung anstehender Weltprobleme genutzt werden kann. Dazu müssten nicht nur die Systemwissenschaftler und Kybernetiker, sondern auch andere Fachexperten ihren Beitrag leisten. Große Erwartungen bestehen auch hinsichtlich des Einsatzes solcher Modelle 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.

## 9. Ausblick

Mit den vorstehenden Ausführungen sollte ein Beitrag zur Aufdeckung der Wirkstruktur ökologischer Systeme geleistet werden. Dabei entstand zunächst ein *qualitatives* Modell. Auf dieser Grundlage kann im nächsten Schritt eine *quantitative* Analyse aufsetzen, die insbesondere das dynamische Verhalten solcher Systeme erfasst. Bei der Erstellung solcher quantitativer Modelle kann wiederum auf bekannte Methoden der Automatisierungstechnik, insbesondere die Systemidentifikation, zurückgegriffen werden. Danach sind gezielte Experimente an der realen Anlage durchzuführen, deren Auswertung die bestehenden kausalen Zusammenhänge in ihrer zeitlichen Abhängigkeit widerspiegelt.

Die Verfügbarkeit dynamischer Modelle von Ökosystemen würde auch die Durchführung von Simulationsexperimenten ermöglichen, die vorzugsweise auf Digitalrechnern ausgeführt werden. Solche Experimente finden auf virtueller Ebene statt, was mit beträchtlichen Vorteilen verbunden ist. So kann die Wirksamkeit von Eingriffen in das betreffende Ökosystem vorab getestet werden ohne das reale System zu beanspruchen. Auf diese Weise können bestimmte Szenarien durchgespielt und die Wirkungen verschiedener Einflussfaktoren („Stellknöpfe“) isoliert voneinander studiert werden. Somit lassen sich Einsichten in die Wirkzusammenhänge komplexer Systeme gewinnen. Damit stünde den Umweltexperten und möglicherweise auch der Politik ein Arbeitsmittel zur Verfügung, das ihren Entscheidungen eine solidere Basis gibt.

Darüber hinaus könnte man an eine *Synthese* von Ökosystemen denken. Dazu wäre eine Steuereinrichtung vorzusehen, welche den Zustand des Ökosystems fortlaufend erfasst und zielorientierte Eingriffe produziert.

Verbleibt noch festzuhalten, welche Erkenntnisse aus den vorstehenden Untersuchungen bezüglich der Tauglichkeit kybernetischer Methoden zur Behandlung natürlicher Systeme zu ziehen sind. Hier konnte im vorliegenden Beitrag gezeigt werden, dass das Methodenrepertoire der Kybernetik durchaus nützliche Beiträge zu leisten vermag. Deutlich wurden aber auch die noch bestehenden Grenzen besonders hinsichtlich der Beherrschung der i. Allg. großen Komplexität und des hohen Vernetzungsgrades. Somit ergibt sich ein Bedarf zur Weiterentwicklung der Kybernetik, dem sich einige Wissenschaftler im Rahmen einer sog. Neokybernetik bereits widmen.