

Entwicklung mathematischer Modelle für biotechnische Prozesse am Beispiel der biologischen Schädlingsbekämpfung

Von **Wolfgang Paul**, Braunschweig-Völkenrode

Aus den Arbeiten des Instituts für landtechnische Grundlagenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode

Mathematische Modelle für Wachstumsprozesse aller Art wären ein erstrebenswertes Fundament für die allgemeine Erforschung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren. Während aber nur sehr unvollkommene Modelle für das Wachstum einer einzelnen Pflanze oder eines einzelnen Tieres existieren, lassen sich für Vermehrungsprozesse von ganzen Populationen schon wesentlich exaktere Modelle aufstellen. Es wird ein Beispiel für die Populationsdynamik aus dem Gebiet der biologischen Schädlingsbekämpfung gegeben und auf die breiten Anwendungsmöglichkeiten der Populationsdynamik hingewiesen.

Der modernen Biologie sagt man für die Zukunft große Entwicklungsmöglichkeiten voraus. Aus den praktischen Anwendungen der wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Gesetzmäßigkeiten des Ablaufes biologischer Prozesse wird sich sicher bald ein Fach „Biotechnologie“ entwickeln. Gerade die Landtechnik arbeitet im Schnittpunkt von Biologie und Technik. Durch das verstärkte Eindringen technischer Produktionsmittel in die Landwirtschaft ergeben sich zunehmend Steuerungs- und Regelungsaufgaben. Ähnlich wie vor Jahrzehnten in der chemischen Industrie beim Übergang zur großindustriellen Verfahrenstechnik benötigt man auch für eine biologische Verfahrenstechnik beim Übergang zur automatischen Steuerung und Optimierung ganzer biologischer Produktionsprozesse möglichst genaue mathematische Modelle. Nachstehend werden deshalb die Möglichkeiten der Aufstellung solcher Modelle untersucht. Es ist dies zugleich eine erste Mitteilung aus einem laufenden Forschungsvorhaben über mathematische Modelle in der Populationsdynamik und ihre Anwendungsmöglichkeiten.

Möglichkeiten der Aufstellung mathematischer Modelle für biotechnische Prozesse

Für die landwirtschaftliche Produktion sind besonders Wachstumsprozesse interessant. Ein gültiges Modell eines Wachstumsvorganges, das die komplizierte Wirklichkeit durch ein irgendwie geartetes idealisiertes System ersetzt und innerhalb bestimmter, möglichst weitgehender Grenzen richtig beschreibt und vorhersagt, setzt nach Möglichkeit Kenntnisse über die Grundbausteine des Vorganges voraus. Denn mit den Kenntnissen über die Grundbausteine wird das Modell einleuchtender, plausibler, und die Wahrscheinlichkeit wächst, ein gültiges Modell zu erstellen.

Erkenntnisse über die Grundbausteine eines Modells für einen biologischen Vorgang sind im allgemeinen nur äußerst schwierig zu erhalten. Die Vorgänge beim Wachsen einer einzelnen Pflanze oder eines einzelnen Tieres sind zwar schon lange Gegenstand der Forschung, leichter scheint es aber, sich die benötigten Kenntnisse in der Ökologie, das ist die Lehre von den Wechselwirkungen zwischen Lebewesen und Umwelt, zu verschaffen. Hier bieten sich nämlich die einzelnen Lebewesen selbst als Grundbausteine geradezu an. Ihr Verhalten und ihre Wechselwirkungen sind von außen beobachtbar und im Experiment meßbar.

Populationsdynamik

Ein für die technische Anwendung besonders wichtiges Gebiet aus der Ökologie ist die Populationsdynamik. Unter einer Population versteht man die Gesamtheit aller tierischen oder pflanzlichen Lebewesen („Individuen“) derselben Art, die einen

bestimmten Lebensraum bewohnen. Die Populationsdynamik beschreibt also die zeitlichen Änderungen der physikalischen Zustände einer Population. Als Zustand einer Population kann man die Anzahl der Individuen, deren Dichte, Biomasse, Altersverteilung oder deren Produkte vereinbaren. In der Mehrzahl der Fälle wird uns aber die Anzahl der Individuen interessieren. Wir müssen deshalb die Änderungen in der Anzahl bilanzieren. Die „Vermehrungsbilanz“ ist also die zentrale Gleichung der Populationsdynamik. Sie besagt für einen bestimmten Zeitraum:

$$\begin{array}{ccccccccc} \text{Änderung} & = & \text{Zuwachs} & + & \text{Zuwachs} & - & \text{Abgang} & - & \text{Abgang} \\ \text{der Anzahl} & & \text{durch} & & \text{durch} & & \text{durch} & & \text{durch} \\ \text{der} & & \text{Ver-} & & \text{Ein-} & & \text{Aus-} & & \text{durch} \\ \text{Individuen} & & \text{mehrung} & & \text{wanderung} & & \text{wanderung} & & \text{Tod} \end{array}$$

Die verbalen Ausdrücke dieser Bilanz muß man nun in mathematische Terme umsetzen. Dazu erfaßt man die biophysikalischen Parameter zwischen Umwelt und Individuum (wie z. B. Temperatur, Nahrungsvorrat, Feindzahl) und die physiologischen Parameter der einzelnen Individuen (wie z. B. Fortpflanzungsraten, Sterberaten). Je nachdem welche Aussagen von der Biologie her kommen, muß man nun das mathematische Modell bauen. Man unterscheidet dabei hauptsächlich deterministische und stochastische Modelle, diskrete und stetige Modelle und schließlich Modelle, die nur über einer unabhängigen Variablen, der Zeit, und Modelle, die über mehrere unabhängige Variable (Zeit, Alter, Gewichtsklassen, räumliche Verteilung) betrachtet werden.

Es ergeben sich Gleichungen, die quer durch die gesamte Mathematik gehen. Ihre einzige Gemeinsamkeit scheint zu sein, daß sie nicht geschlossen lösbar sind. Gleichwohl sind sie aber mit den modernen Rechenanlagen simulierbar und entsprechend ist auch das ganze Gebiet der Populationsdynamik, das mit seinen Wurzeln in die zwanziger Jahre dieses Jahrhunderts reicht [1; 2], auch eines der Gebiete, die sich erst richtig mit dem Aufkommen der modernen Rechengenäte entwickeln konnten. In den Zeitschriften [3 bis 7] findet man am ehesten Aufsätze über dieses Gebiet. Diese kleine Auswahl zeigt schon, daß auch in der Populationsdynamik, wie übrigens in vielen Gebieten, die das Arbeiten mit Rechengenäten voraussetzen, der Vorsprung der Angelsachsen groß ist.

Wie nun ein Modell für die Populationsdynamik aussehen kann, soll an einem Beispiel aus der biologischen Schädlingsbekämpfung erläutert werden.

Die biologische Kontrolle von Schadmilben durch die Raubmilbe *Phytoseiulus riegeli* Dosse

Schadmilben der Art *Tetranychus cinnabarius* („Rote Spinne“) oder *Tetranychus urticae* („Bohnenspinmilbe“) sind weitverbreitete Pflanzenschädlinge. Diese Spinnmilben saugen die Blätter von Pflanzen fast aller Arten an, so daß die Blätter vorzeitig welken und abfallen und der Ertrag und das Wachstum der Pflanzen stark zurückgehen. Die Bekämpfung des Schädlinge erfolgt normalerweise mit Insektiziden.

Wenn man aber Pflanzenschutzmittel nicht anwenden will oder kann (sei es, daß man Schäden für Mensch oder Tier befürchtet, sei es, daß die Schädlinge resistent geworden sind), so bleibt noch die Methode der biologischen Schädlingsbekämpfung. Man setzt die natürlichen Feinde der Schädlinge aus und wartet, bis die Räuber die Schädlinge weggefressen haben. Eine solche biologische Schädlingsbekämpfung ist für unseren Fall nach [8] ebenso erfolgreich wie eine drei- bis fünfmalige Spritzung.

Zur Berechnung der Populationszahlen benötigen wir zunächst die biologischen Daten der Milben. Wir stützen uns dabei auf die Angaben in [8]. Die biologischen Daten seien im folgenden

Dipl.-Ing. Wolfgang Paul ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.

kurz skizziert. Beide Milbenarten haben einen Lebenszyklus Eier → Larven → Milben. Ihre Entwicklungszeiten sind aber unterschiedlich. Die Lebensdauer wird jedoch für beide Arten als gleich angenommen, ebenso die Eiablage bei maximalem Futterangebot. Alle drei Raten sind aber stark temperaturabhängig. Darüber hinaus wirkt auf die Eiablage der Raubmilben auch noch das Nahrungsangebot ein, während für die Schadmilben angenommen wurde, daß sie stets ein reichliches Nahrungsangebot finden. Die interessierenden Raten sind in **Bild 1 bis 5** aufgetragen. Die Punkte bezeichnen dabei gemessene Werte. Mit diesen Raten und den vorgegebenen Anfangswerten berechnen wir nun die Entwicklung fortlaufend von Tag zu Tag. Was pro Tag alles berechnet oder berücksichtigt wird, zeigt das Rechenfußdiagramm **Bild 6**. Das chronologische Alter der Individuen wurde hier nicht betrachtet, sondern das physiologische

Alter je nach Alterung. Denn abhängig von dem Verlauf der Außentemperatur durchlaufen die Tiere die einzelnen Entwicklungsstadien verschieden schnell.

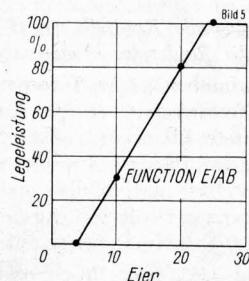
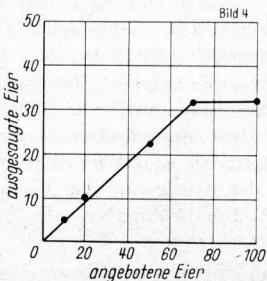
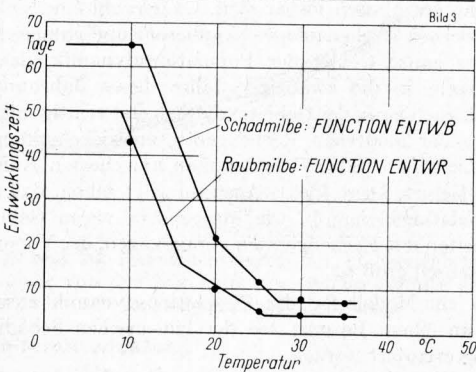
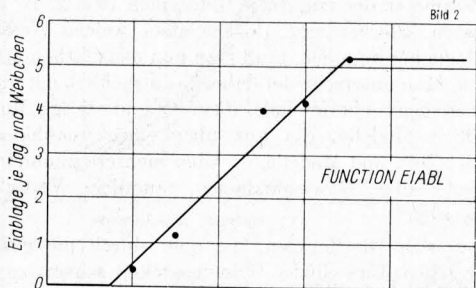
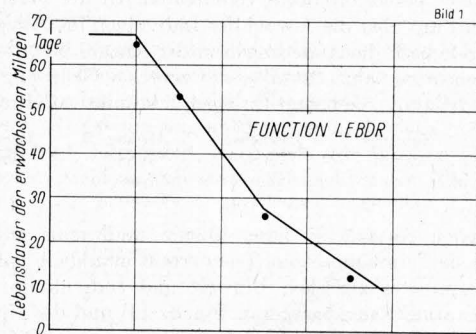


Bild 1 bis 5. Lebensdauer, Eiablage und Entwicklungsdauer der Schad- und der Raubmilben in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Nahrungsangebot.

- Bild 1. Lebensdauer der erwachsenen Schad- bzw. Raubmilben.
- Bild 2. Anzahl der bei maximalem Nahrungsangebot pro Schad- bzw. Raubmilben-Weibchen täglich gelegten Eier.
- Bild 3. Entwicklungszeit, die vergeht, bis aus einem soeben abgelegten Ei ein erwachsenes Tier entstanden ist.
- Bild 4. Verhältnisse des Nahrungsangebots (Eier der Schadmilbe) zur Nahrungsausnutzung bei der Raubmilbe.
- Bild 5. Einfluß der Futtermenge (Eier der Schadmilbe) auf die Eiablage der Raubmilbe.

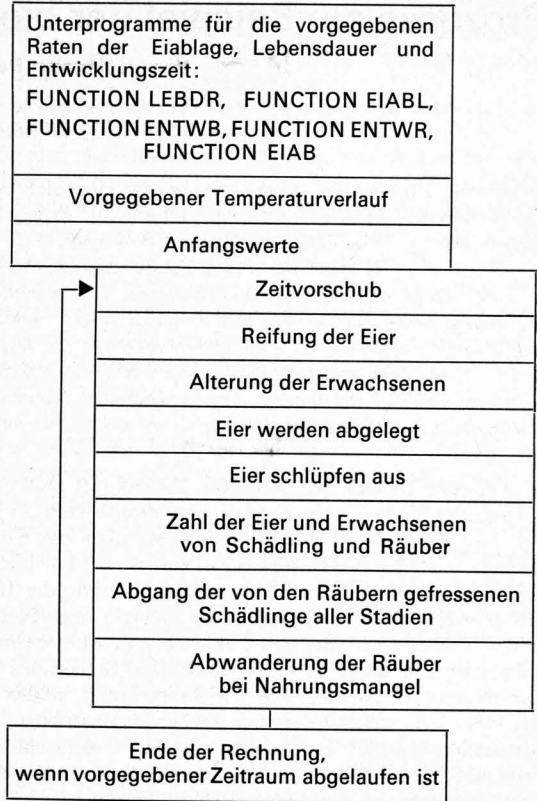


Bild 6. Rechenfußdiagramm für die Simulation einer Räuber-Beute-Beziehung aus Raubmilben und Schadmilben.

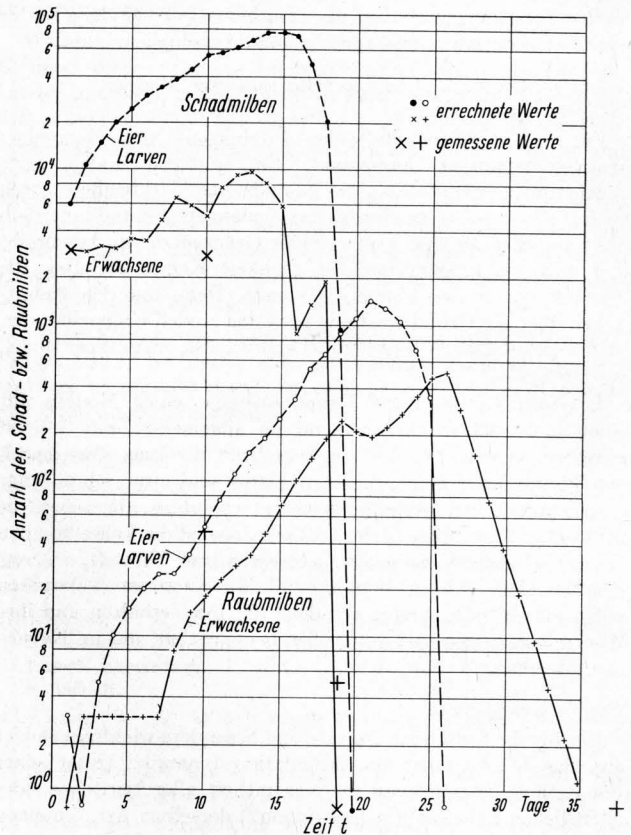


Bild 7. Zahl der Erwachsenen, Larven und Eier von Schadmilben und Raubmilben bei 25°C in Abhängigkeit von der Zeit. Anfangswerte: 3000 erwachsene Schadmilben, 6000 abgelegte Eier der Schadmilben, 3 Larven der Raubmilben

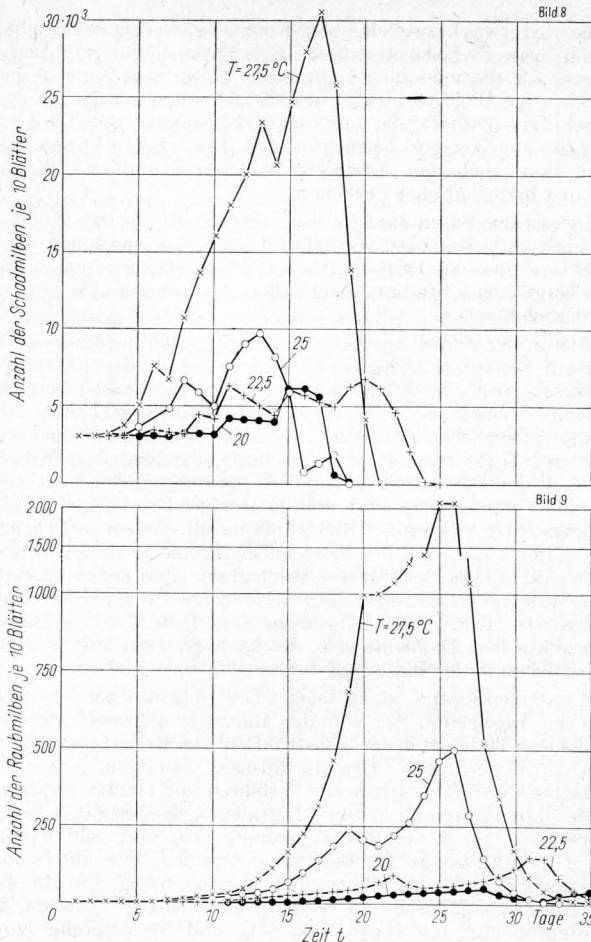


Bild 8 und 9. Entwicklung der Schadmilben und der Raubmilben bei verschiedenen Temperaturen.

Für die Berechnung wurde auch angenommen, daß eine Schadmilbe den Futterwert von zwei Schadmilbeneiern oder zwei Schadmilbenlarven hat, daß andererseits aber alle Stadien gleichmäßig vernichtet werden. Bei Nahrungsmangel lautet die Annahme, daß zwar alle schon abgelegten Eier der Raubmilbe noch ausschlüpfen, andererseits aber täglich die Hälfte aller vorhandenen Raubmilben abwandert oder stirbt.

Für die Anfangswerte 3 Larven der Raubmilbe und 3000 erwachsene Schadmilben mit 6000 schon abgelegten Eiern (Verhältnis größer als 1:1000!) liefert das Modell bei 25°C das in Bild 7 gezeigte Ergebnis. Es sind die gerechneten Populationszahlen pro 10 Blatt aufgetragen und drei gemessenen Werten gegenübergestellt. Wir erkennen, daß die Räuber selbst

bei äußerst ungünstigen Ausgangszahlen schnell mit dem Schädling fertig werden.

Anhand eines Modelles kann man natürlich nun leicht alle möglichen interessierenden Variationen durchrechnen. Interessant ist zum Beispiel, wie schnell eine (künstlich eingebrachte) stärkere Ausgangspopulation von Räubern mit einem starken Befall an Schädlingen fertig wird, oder aber, wie die Populationszahlen für verschiedene Temperaturen verlaufen. Die letztere Frage beantworten Bild 8 und 9, in denen die simulierte Entwicklung von Räuber und Schädling für verschiedene Temperaturen aufgetragen ist. Man erkennt große Unterschiede für steigende Temperaturen.

Neben diesem Beispiel aus der biologischen Schädlingsbekämpfung lassen sich sofort noch weitere Bereiche angeben, in denen populationsdynamische Untersuchungen für die Vorhersage, Steuerung und Optimierung biologischer Vorgänge von Wert sind:

1. für den großen Bereich der schon angewandten Mikrobiologie (Antibiotika, Gärungsprodukte, Enzyme, Abwasseraufbereitung);
2. für neue Verfahren der Nahrungsmittelproduktion (z. B. der schnellen und billigen Herstellung von Nahrung aus Algen im kontinuierlichen Betrieb);
3. für die Steuerung biologischer Gleichgewichte (nicht nur bei der Schädlingsbekämpfung, sondern auch bei der pflanzlichen und tierischen Produktion);
4. für Fragen optimaler Abschöpfung bei gleichbleibendem Bestand (z. B. in der Fischereitechnik, Forsttechnik);
5. für den Verlauf von Epidemien und
6. für Fragen der Züchtung und Auslese.

Schließlich, und damit wird die anfangs aufgeworfene Frage nochmals aufgegriffen, gibt es auch Ansätze, die einzelnen Zellen eines Gewebes in einem Tier oder in einer Pflanze als Grundbausteine zu betrachten, um so über populationsdynamische Modelle zu einer mathematischen Beschreibung des Wachstumsvorganges eines einzelnen Individuums zu kommen.

Schrifttum

Bücher sind mit ● gekennzeichnet

- [1] ● Lotka, A. J.: Elements of mathematical biology. Dover, New York 1925.
- [2] ● Volterra, V.: Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie. Gauthier-Villars, Paris 1931.
- [3] Bulletin of mathematical Biophysics, Chicago.
- [4] Journal of theoretical Biology, London.
- [5] Mathematical Biosciences, New York.
- [6] Biometrics, Atlanta, Ga.
- [7] Biotechnology and Bioengineering, New York.
- [8] Bravenboer, L., und G. Dosse: Phytoseiulus riegeli Dosse als Prädator einiger Schadmilben aus der Tetranychus urticae-Gruppe. Entomology exp. & appl. 5 (1962) S. 291 ff.

Biotechnik in der Landmaschinenindustrie*)

Die moderne Betrachtungsweise der Biologie eröffnet dem Ingenieur ein Grundlagengebiet, das für seine Aufgaben in Forschung und Entwicklung beträchtlich an Bedeutung gewinnt. Funktion und Mechanismus vieler biologischer Systeme können Anregungen auf nahezu allen Ingenieurgebieten geben und der schöpferischen Arbeit sehr förderlich sein. Berührungspunkte zwischen Biologie und dem Ingenieurwesen sind überall vorhanden, jedoch ganz besonders ist der Landtechniker hiervon betroffen. Er hat außer dem System Mensch und Maschine auch die Systeme Pflanze und Maschine und Tier und Maschine in seine Arbeiten mit einzubeziehen. Unter Biotechnik ist ein Wissensgebiet zu verstehen, das die Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen dem Lebendigen und der durch technische Prozesse gekennzeichneten Umwelt darlegen soll. Durch die auszugsweise Wiedergabe eines Vortrages über „Biotechnik in der Landmaschinenindustrie“ von M. W. Forth und W. M. Roll auf

dem ASAE-Meeting im Dezember 1968*) soll auf die in Zukunft sicher stärker in Betracht zu ziehenden Aufgaben der Biotechnik in Lehre und Forschung aber, wie der Vortrag zeigt, auch in der Industrie aufmerksam gemacht werden. Außerdem ist es interessant zu sehen, welchen technischen Wissensgebieten man in der US-Landmaschinenindustrie besondere Bedeutung beimißt.

Biotechnik oder auch Bioingenieurwesen ist ein junges Wissensgebiet, das in zahlreichen Bereichen der Wissenschaft Eingang gefunden hat. Biotechnik gehört ebenso zur modernen Medizin wie zur organischen Chemie. An dieser Stelle sollen einige Aufgaben der Biotechnik betrachtet werden, die mit landtechnischen Problemen, d. h. mit der Beziehung Mensch—Maschine, Pflanze—Maschine und Tier—Maschine, in Zusammenhang stehen.

Aufgabe der Landmaschinenindustrie ist es, geeignete Maschinen für die Landwirtschaft zu produzieren. Das Interesse der Industrie an der Biotechnik reicht in diesem Zusammenhang nur soweit, als dieses Wissensgebiet zur Entwicklung und Verbesse-

*) M. W. Forth and W. M. Roll, Engng. Res. Div., Deere & Comp. Bioengineering in the farm equipment industry. ASAE-Paper Nr. 68-553. Amer. Soc. Agric. Engrs., St. Joseph, Mich. 1968. Daraus dieser Auszug.