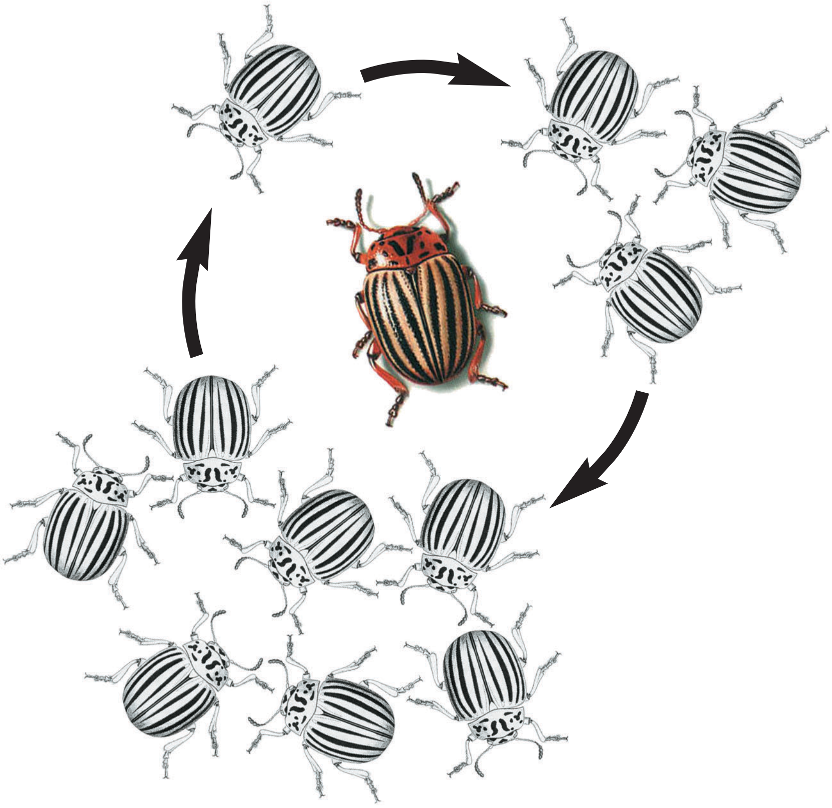
Modellierung ökologischer Systeme mit rekurrenten Fuzzy-Systemen

PROF. DR.-ING. JÜRGEN ADAMY, ROLAND KEMPF, MA



Einleitung

Zur Beschreibung von Zusammenhängen und Vorgängen, die seine Lebensumstände betreffen, hat der Mensch ein mächtiges Werkzeug geschaffen: die Sprache. Mit ihr kann er nicht nur Erlebtes beschreiben, sondern es auch abstrahieren und dieses Wissen an Mitmenschen weitergeben. Diese können sich dann ein Modell der Wirklichkeit machen, ohne die darin enthaltenen Erfahrungen direkt machen zu müssen.

Mit Hilfe der Alltagssprache ist es möglich, statische Zusammenhänge auszudrücken: „Wenn der Strauch einen starken Befall von Blattläusen hat, wird er wenige reife Beeren tragen.“ Desweiteren können auch Veränderungen beschrieben werden: „Wenn ich den Boden ausreichend dünge, dann wird sein Nährstoffgehalt von einem niedrigen Niveau auf ein ausreichendes Niveau ansteigen.“

Wendet man sich allerdings den Naturwissenschaften bzw. ihrer Nutzung in den Ingenieurwissenschaften zu, so wird schnell deutlich, dass in diesen Bereichen die Alltagssprache nicht ausreicht. Sie ist zu unpräzise, zu schwammig. Deshalb hat sich zur Beschreibung eine andere Art der Sprache herausgebildet und bewährt: Die Formelsprache der Mathematik. Mit ihr sind auch statische Zusammenhänge, wie „Druck = Kraft/Fläche“ und Veränderungen beschreibbar, wie „dx/dt=sqrt(2 g x)“, d.h. die zeitliche Änderung des Weges dx/dt im freien Fall wächst mit der Wurzel des zurückgelegten Weges x an.

Es treten allerdings auch Fälle auf, in denen man gerne die beiden Spracharten kombinieren oder die eine in die andere umformen möchte. Angenommen man hat durch den alltäglichen Umgang gelernt, wie man eine Maschine bedienen muß, damit sie optimal funktioniert. Auf der einen Seite kann man seine Bedienungsstrategie in Alltagssprache formulieren, andererseits benötigt man für die technische Anwendung dieses Wissens eine mathematische Beschreibung, um beispielsweise die Maschine „intelligenter“ zu machen und den Bediener durch eine geeig-

Modellierung ökologischer Systeme mit rekurrenten Fuzzy-Systemen

For many dynamical systems and processes in biology, finance, sociology and engineering both the verbal and a prevalent mathematical description are useful. The verbal description is easier to obtain and comprehend. The mathematical description provides detailed, quantitative information. With recurrent fuzzy systems, a new class of dynamical systems, both the mathematical as well as the verbal model can be obtained simultaneously. In this paper this ability of recurrent fuzzy systems is illustrated by means of an ecological process with intraspecific competition.

nete Steuerung der Maschine zu entlasten. Oder es treten Zusammenhänge in Wissenschaftszweigen, wie den Wirtschaftswissenschaften, der Soziologie oder Biologie auf, für die es zwar nur unzureichende bzw. unsichere Daten gibt, allerdings genug Erfahrungswissen vorhanden ist, um den Zusammenhang umgangssprachlich zu formulieren. Auch hier macht es Sinn das sprachlich formulierte Wissen zu mathematisieren, um es zum Beispiel mit vorliegenden Datenreihen verknüpfen zu können.

In diesen Übergangsbereichen kann man mit Hilfe der Fuzzy-Logik [10] die „unscharfe" (engl.: fuzzy) Alltagssprache adäquat beschreiben und somit Simulationen, Berechnungen und eventuell einer technischen Verwertung zugänglich machen.

Verbaler Modellteil		aktuelle Populationsgröße: klein	mittel	groß
Nahrungsangebot	klein	klein	klein	klein
	mittel	mittel	mittel	klein
	groß	mittel	groß	mittel

Abbildung 1: Regelbasis mit den Regeln für das erste ökologische Modell

Rule base containing the rules for a first ecological model

Sprachliche Modellierung der intraspezifischen Konkurrenz

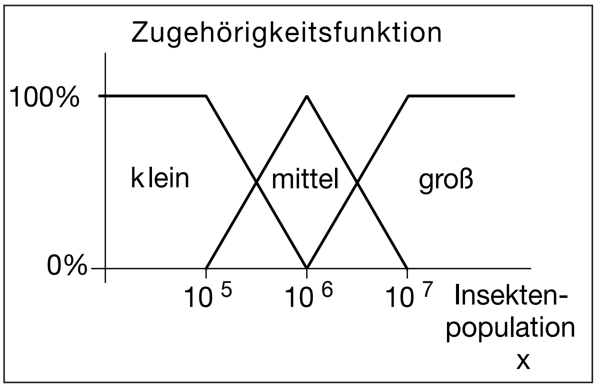
Die Verwendung von Fuzzy Logik zur Umwandlung von Alltagssprache in eine mathematische Beschreibung wird hier am Beispiel eines einfachen sprachlichen Modells erläutert, das die Veränderung der Populationsgröße einer Insektenpopulation beschreibt. Die zukünftige Populationsgröße einer Spezies hängt sicherlich von der aktuellen Populationsgröße und der zur Verfügung stehenden Nahrungsmenge ab. Effekte, die durch Migration oder Räuber auftreten werden hier nicht modelliert.

Die Populationsgröße wird durch Adjektive wie „klein", „mittel" oder „groß" beschrieben. Auch die Nahrungsmenge wird hier durch „klein", „mittel" oder „groß" charakterisiert, wobei auch andere Adjektive denkbar wären.

Die Zusammenhänge der Grössen werden in Form von Regeln aufgestellt: Wenn das Nahrungsangebot klein ist, wird die Populationsgröße unabhängig von ihrem aktuellen Wert auf eine kleine Population schrumpfen. Bei einer kleinen oder mittleren Population führen dagegen mittlere oder große Nahrungsmengen zu mittel bzw. großen Populationen. Große Populationen behindern sich manchmal in ihrer Fortpflanzung. So verbraucht eine große Population in so kurzer Zeit die zur Verfügung stehende Nahrung, dass nur wenige Tiere das fortpflanzungsfähige Alter erreichen. Diese gegenseitige Behinderung wird auch „intraspezifische Konkurrenz" [4] genannt und äußert sich in folgender Regel: Eine große Population wird bei einem kleinen oder mittleren Nahrungsangebot auf ein kleines Niveau fallen und bei einem hohen Nahrungsangebot auf ein mittleres Niveau. Alle diese Regeln sind der Übersicht halber in einer Tabelle in Abb.1 zusammengefaßt. Die Tabellenachsen sind Nahrungsangebot und aktuelle Populationsgröße. Die Tabellenwerte bilden die neuen Populationswerte, die sich aus aktueller Populationsgröße und Nahrungsmenge ergeben.

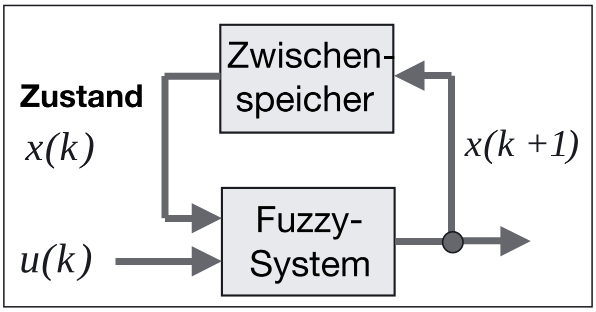
Abbildung 2: Zugehörigkeitsfunktionen für „kleine", „mittlere" und „große" Insektenpopulationen x

Membership functions for „small", „middle" and „big" insect populations, x



Mathematische Modellierung

Um von den sprachlichen Regeln zu einem mathematischen Modell zu gelangen, wird jeder sprachlichen Beschreibungen der Größen ein Zahlenwert zugewiesen: in diesem Fall 10^5 für eine kleine, 10^6 für eine mittlere und 10^7 für eine große Population. Liegt die aktuelle Populationsgröße unterhalb von 10^5 bzw. oberhalb von 10^7, so gelten nur die Regeln für „kleine" bzw. „große" Populationen. Für Populationen, die zwischen zwei dieser Werte, z.B. zwischen 10^5 und 10^6 liegen, wird mit Hilfe einer



sogenannten Zugehörigkeitsfunktion festgelegt, wie stark dieser Wert den jeweiligen Grenzen ähnelt, z.B. ergeben sich für den Wert $250000=10^{5.4}$ nach Abb.2 die Werte 60% für „klein" und 40% für „mittel".

Bei der Auswertung der Regeln an solchen Zwischenwerten werden einfach die Folgerungen der Regeln je nach ihrer Relevanz gewichtet. Wenn man den Adjektiven des neuen Zustandes wieder den gleichen Zahlenwert wie oben zuordnet, erhält man wieder eine Zahl, die die Populationsgröße beschreibt. So ergibt sich bei einer Population von ca. 250000 und einer großen Nahrungsmenge nach Auswertung der Regeln des Modells eine Verteilung von 40% „klein" und 60% „mittel" für die neue Population, was wiederum einem Zahlenwert von $10^{5.6}=400000$ entspricht.

Fuzzy-Logik und rekurrente Fuzzy-Systeme

Durch die obige Prozedur erhält man einen statischen Zusammenhang zwischen der aktuellen Population und der neuen Population in Abhängigkeit der Nahrungsmenge, der maßgeblich durch die sprachlich formulierten Regeln bestimmt wird. Die betrachteten Größen haben noch eine weitere Beziehung zueinander, die durch die Regeln beschrieben wird: Die neue Populationsgröße wird in der Zukunft die aktuelle Populationsgröße sein. Wenn eine Prognose für die Nahrungsmengen für die nächsten Zeitschritte zur Verfügung steht, kann man so eine Prognose für die Populationsgröße geben.

Abbildung 3: Blockschaltbild eines rekurrenten Fuzzy Systems

Block schematic of a recurrent fuzzy system

Da sich nur die Ausgangssituation, nicht aber die Regeln selbst ändern, kann man das Verhalten durch ein System beschreiben, das den aktuellen Zustand der Population speichert und für den nächsten Rechenschritt zur Verfügung stellt. Dies ist in Abb.3 zu sehen. Die Regeln beschreiben somit einen dynamischen Vorgang. Durch diese Erweiterung wird aus dem klassischen Fuzzy-System ein Fuzzy-System mit Rückkopplung, ein sogenanntes rekurrentes Fuzzy-System [2,3,7].

Führt man die Berechnungen für den Fall eines gleichbleibend großen Nahrungsangebot durch, so schwingt die Populationsgröße über mehrere Zeitschritte, wie in Abb.4 zu sehen ist. Die Schwingungen treten zwischen „mittleren" und „großen" Populationsgrößen auf. Dies steht im Einklang mit den Regeln in der Regelbasis von Abb.1. Auch im sprachlichen Modell ist eine Oszillation zwischen diesen sprachlichen Werten für große Nahrungsmengen zu sehen, wie durch die Pfeile in Abb.1 angedeutet ist.

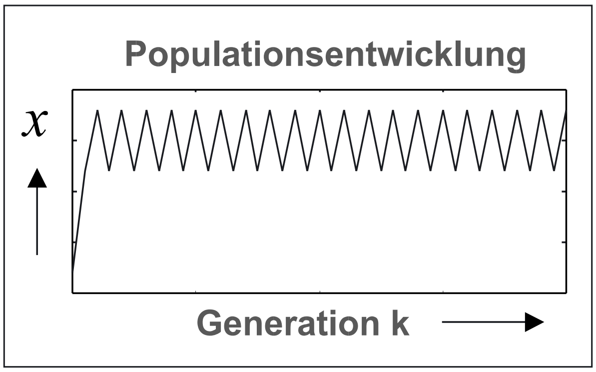


Abbildung 4: Zeitreihe der Insektenpopulation x für das erste ökologische Modell bei großer Nahrungsmenge

Time series of the insect population x according to the first ecological model in the case of a high availibility of food

Chaos bei der intraspezifischen Konkurrenz

Man stelle sich nun vor, dass der Effekt der intraspezifischen Konkurrenz so groß ist, dass auch bei großem Nahrungsmittelvorrat eine große Populationen wieder auf eine kleine Population im nächsten Zeitschritt schrumpft. Folgt man den neuen Regeln, so ergebt sich für große Nahrungsmengen eine Schwingung der Populationsgröße von „klein" zu „mittel" zu „groß" und wieder zu „klein", wie in Abb.5 angedeutet ist.

Betrachtet man nur diese Regeln bei großen Nahrungsmengen, so könnte man auch eine Oszillation im mathematischen Modell erwarten. Tatsächlich ist diese Oszillation im mathematischen Modell aber instabil. Das bedeutet, dass bei einer geringen Störung des Systems sich die zeitliche Entwicklung der Populationsgröße anders verhält. Die Frage ist nur: wie?

Während das sprachlichen Modell nur für sehr unterschiedliche Startwerte, nämlich nur „kleine", „mittlere" und „große" Populationen, untersucht werden kann, sind beim mathematischen Modell Simulationen für alle Zwischenwerte möglich. Abb.6 zeigt die Simulation des Systems für zwei ähnliche Startwerte. Die Populationsgröße mündet in keinem Grenzzyklus und strebt auch keinem festen Endwert zu. Das

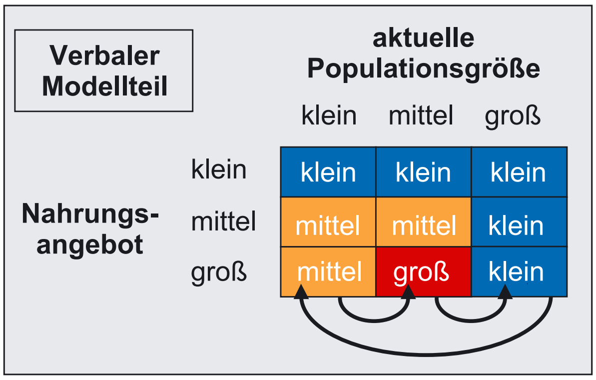


Abbildung 5: Regelbasis mit Regeln für das zweite, chaotische ökologische Modell

Rule base containing the rules for a second, chaotic, ecological model

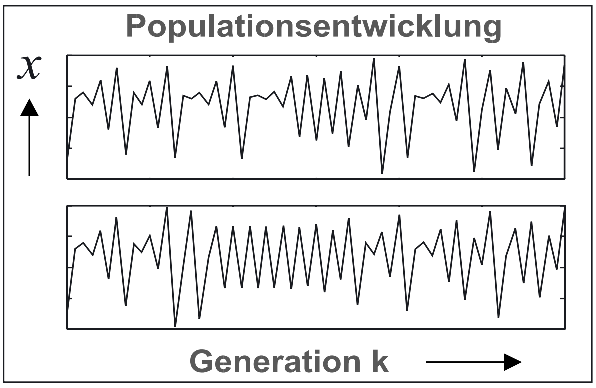


Abbildung 6: Zeitreihen der Insektenpopulation x für das zweite, chaotische ökologische Modell bei großer Nahrungsmenge. Ähnliche Startwerte führen zu sehr unterschiedlichen Zeitreihen.

Time series of the insect population x according to the second, chaotic, ecological model in the case of a high availibility of food. Similar inital values lead to widely differing time series.

Verhalten ist irregulär und nicht vorhersagbar, da ähnliche Startwerte zu ganz verschiedenen Zeitreihen führen. Chaos tritt auf [6,8,9].

Trotz des scheinbaren Widerspruches kann man eine Reihe von Kriterien aufstellen, mit denen man auf chaotisches Verhalten in solchen rekurrenten Fuzzy-Systemen schließen kann, und für dessen Überprüfung man nur die Regeln betrachten muß. So kann man zeigen, dass man immer ein chaotisches Verhalten für spezielle Startwerte erhält, wenn die Regeln einen Zyklus aufweisen, dessen Länge keine Potenz von 2, also nicht 1,2,4,8,... ist [6]. Im ersten Modell hatten wir den Zweierzyklus „mittel“ -> „groß“ -> „mittel“ und kein Chaos. Im zweiten Modell hatten wir dagegen den Dreierzyklus „klein“ -> „mittel“ -> „groß“ -> „klein“ und damit trat Chaos auf.

Eigenschaften von rekurrenten Fuzzy-Systemen

Die Chaoskriterien sind nur eine Facette in der allgemeinen Untersuchung rekurrenter Fuzzy-Systeme. Interessant ist auch die Fragestellung, wann man das gesamte Verhalten des rekurrenten Fuzzy-Systems direkt aus den Regeln ablesen kann, also wann sich das rekurrente Fuzzy-System für jeden möglichen Startwert so verhält, wie man es von den Regeln her erwartet [3]. Dann ist es möglich auch technische Systeme auf Basis einfacher Regeln zu entwerfen, ohne sie durch Simulationen im Anschluß testen zu müssen.

Das Anwendungsspektrum dieser rekurrenten Fuzzy-Systeme erstreckt sich nicht nur auf die Modellierung ökologischer Vorgänge [5], sondern kann auch zur Entscheidungsfindung in der künstlichen Intelligenz, Expertensystemen zur Unterstützung von Entscheidungen, in Steuerungen im Bereich der Robotik oder zur Mustererkennung zum automatischen Entdecken von Fehlern in technischen Anlagen [1,7] genutzt werden. Also in Bereichen in denen, wie im gezeigten Beispiel, unscharfe Regeln das Verhalten bestimmen.

Literaturhinweise:

[1] J. Adamy, Device for early detection of runout in continuous casting, deutsche Patentanmeldung P4442087.0 (1994), US Patent 5.904.202

[2] J. Adamy, Breakout Prediction for Continuous Casting by Fuzzy Mealy Automata, Proc. EUFIT (1995) 754-759

[3] J. Adamy und R. Kempf, Recurrent fuzzy systems, eingereicht bei Fuzzy Sets and Systems

[4] M.E. Bergon, J.L. Harper und C.P. Townsend, Ökologie, Springer Verlag, Berlin, 1998

[5] W. Bock und A. Salski, A Fuzzy Knowledge-based Model of Population Dynamics of the Yellow-necked Mouse (Apodemus flavicollis) in a Beach Forest, Ecol. Modelling 108 (1998) 155-161

[6] R. Kempf and J. Adamy, Chaos in recurrent fuzzy systems, angenommen zur Veröffentlichung in Fuzzy Sets and Systems

[7] R. Kempf und J. Adamy, Rekurrente Fuzzy-Systeme, Thema Forschung 1 (2001) 90-94

[8] W. Krabs, Dynamische Systeme: Steuerbarkeit und chaotisches Verhalten, Teubner, Stuttgart, 1998

[9] T.-J. Li und J.A. Yorke, Period three implies chaos, AMM 82 (1975) 985-992

[10] L. Zadeh, Fuzzy Sets, Information and Control (1965) 338-353

Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik (RTR) an der TU Darmstadt

Das Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik ist Teil des Instituts für Automatisierungstechnik des Fachbereichs Elektrotechnik und Informationstechnik.
Forschungsschwerpunkt ist die Bionik in der Automatisierungs- und Regelungstechnik. D.h. die Nutzung biologischer Mechanismen für automatisierungs- oder regelungstechnische Aufgabenstellungen. Unter diesem Dach wird insbesondere in den Bereichen „Computational Intelligence“ und „Autonome mobile Roboter“ geforscht.
Entwickelt und genutzt werden z.B. Methoden der Evolutionären Programmierung. Diese werden insbesondere zur Modellbildung komplexer Prozesse, die nicht hinreichend effizient durch Standardansätze beschreibbar sind, angewandt. In Kooperation mit Firmen der Biotechnologie wurde und wird das Verfahren erfolgreich genutzt.
Des weiteren werden rekurrente Fuzzy-Systeme untersucht. Den Schwerpunkt bildet hierbei die Ausarbeitung der Systemtheorie dieser Systeme.
Im Bereich der „Autonomen mobilen Roboter“ werden Verfahren entwickelt, um autonom in einer a priori unbekannten Umgebung zu navigieren. Dabei sind insbesondere Verfahren zur selbständigen Überwachung der ausgeführten Handlungen von Interesse.
In beiden Bereichen existieren Analogien in der Biologie, sei es die Vorgehensweise der Evolutionären Algorithmen, die an das natürliche Selektions- und Mutationsprinzip angelehnt ist, oder die Verwandtschaft des Verhaltens der Fuzzy-Systeme mit dem menschlichen Urteilsvermögen. Ebenso gibt es Parallelen bei der Umgebungsexploration von Lebewesen und möglichen Navigationsstrategien eines mobilen Roboters.
Daher spielt bei der Entwicklung von Ideen hier oft die Bionik eine zentrale Rolle, um neue technische Lösungen zu gewinnen.

Ansprechpartner:
Prof. Dr.-Ing. J. Adamy
Tel. 0 61 51 / 16-52 37
JAdamy@iat.tu-darmstadt.de
Roland Kempf, MA
Tel. 0 61 51 / 16-35 42
rdkempf@rtr.tu-darmstadt.de

Technische Universität Darmstadt
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik
Landgraf-Georg Straße 4, 64283 Darmstadt
Fax. 0 61 51 / 16-2507
http://www.rtr.tu-darmstadt.de