

Heiko Apel, Andreas Herrmann, Otto Richter

Ein Entscheidungshilfesystem für IPM von *Helicoverpa armigera* in den Tropen und Subtropen auf Basis eines regelbasierten Fuzzy-Modells

Bedarfsorientierte Schädlingsbekämpfungsmaßnahmen bedürfen neben einem fundierten Wissen über Ökologie und Populationsdynamiken der Schädlinge und Wirtspflanzen und ökonomischen Schadensschwellen auch eines Instrumentariums zur Entscheidungsfindung. Hier wird ein System vorgestellt, das Expertenwissen in ein regelbasiertes Fuzzy-Modell einbindet und das es ermöglicht, auch diverse Unsicherheiten bei den Entscheidungen zur Schädlingskontrolle quantitativ zu berücksichtigen.

1 Problematik: Notwendigkeit des Einsatzes von Soft Computing-Methoden

Das allgemeine Problem einer bedarfsorientierten Schädlingsbekämpfung ist die Vorhersage über das Auftreten der Schädlinge und der zu erwartenden Ertragseinbußen. Die gängigen deterministischen Methoden zur Modellierung von Populationsdynamiken sind in ihrer Prognosegenauigkeit zwar sehr verlässlich, benötigen aber relativ viele Daten zur Modellerstellung wie auch zur Modellanwendung (Söndergerath und Müller-Pietralla, 1996; Nörtersheuser et al., 1993). Dadurch ist die Praktikabilität dieser Modelle recht eingeschränkt, denn die erforderlichen Datenmengen und -qualität zur Parameterbestimmung und Eingabe in das Modell sind unter Freilandbedingungen, d.h. unter nicht-experimentellen Bedingungen, oft nicht aufzubringen. Die Daten bzw. Informationen sind dort zum Teil oder gänzlich qualitativer Natur, was den Einsatz entsprechender Methoden, die solche Informationen verarbeiten können, erfordert. Eine dieser Methoden, die unter dem Begriff "Soft Computing" zusammengefaßt werden, ist die Fuzzy-Modellierung, das ist die Modellierung mit Hilfe unscharfer Mengen (Bardossy und Duckstein, 1995). Durch diese Methode kann den Unsicherheiten in der Datenerfassung, im Wissen über die Funktionalität des zu modellierenden Systems sowie der Heterogenität und Variabilität des Naturraumes Rechnung getragen und zusätzlich auch Expertenwissen einbezogen werden. Im Folgenden soll an einem Beispiel gezeigt werden, wie mit Hilfe der Fuzzy-Modellierung ein Entscheidungshilfesystem (EHS) zur Schädlingsbekämpfung entwickelt werden kann.

2 Grundlagen des Entscheidungshilfesystems

Die allgemeine Grundlage für die Entwicklung eines EHS zur Schädlingsbekämpfung sollte das ökonomische Schadensschwellenprinzip sein. Mit diesem Prinzip werden die Kosten einer Schädlingsbekämpfungsmaßnahme mit den zu erwartenden Schäden, hervorgerufen durch den Schädlingsbefall, abgewogen und dadurch die Bekämpfungsmaßnahme optimiert. Gleichzeitig lassen sich auch die ökologischen

Schäden, die durch präventive und übermäßige Pestizidapplikationen verursacht werden können, reduzieren. Bettet man dieses Prinzip in ein integriertes Schädlingsmanagement (IPM, Integrated Pest Management) ein, so ergibt sich ein umfassendes Konzept zur Schädlingsbekämpfung, das unter Reduzierung der ökologischen Schäden optimale monetäre Erträge erzielen kann. Dazu bedarf es allerdings eines umfassenden Wissens über die Populationsdynamik der zu betrachtenden Schädlinge, über die Entwicklungsstadien der Wirtspflanze, die Umweltansprüche der Schädlinge, der Schadensschwellen und der zur Verfügung stehenden chemischen und biologischen Bekämpfungsmaßnahmen. Aufgrund der Komplexität dieses Problems ist ein Modell zur Beschreibung der Struktur des EHS hilfreich. Als Werkzeug zur Modellierung bietet sich ein regelbasiertes Fuzzy-Modell an, das:

- a) unser Verständnis und Wissen über das System durch Kompartimentierung und Formulierung von Regelknoten mit linguistischen Regeln umfassend und plausibel abbildet,
- b) den Unsicherheiten in der Datenlage und der natürlichen Heterogenität und Variabilität durch Verwendung von unscharfen Mengen Rechnung trägt,
- c) die Unsicherheiten im Wissen über die Prozesse im System durch Einführung von Sicherheits-/Gewichtungsfaktoren in der Regelformulierung abbildet und
- d) die Komplexität natürlicher Systeme durch Einbeziehung auch der Faktoren, die nur vage bekannt sind, berücksichtigt kann.

Neben der Darstellung der Prozesse und Beziehungen des Systems bietet diese Methode die Möglichkeit der Formalisierung des menschlichen Entscheidungsfindungsprozesses, der basierend auf hauptsächlich qualitativen Ausgangsinformationen Lösungen findet (Bardossy und Duckstein, 1995). Gerade diese Eigenschaft macht die regelbasierte Fuzzy-Modellierung höchst interessant für das hier beschriebene Problem.

3 Erstellung eines regelbasierten Fuzzy-Modells für ein Entscheidungshilfesystem

Als Beispiel für die Erstellung des EHS soll ein Schädling dienen, der die Landwirtschaft in vielen tropischen, subtropischen und mediterranen Ländern vor erhebliche Probleme stellt: *Helicoverpa armigera* (Baumwollkapselwurm), ein Nachtfalter, dessen Raupen große Schäden hauptsächlich in Gemüse, Baumwolle und Hülsenfrüchten, aber auch in Getreiden verursachen.

Begünstigt durch die dort vorherrschenden klimatischen Verhältnisse und den oft übermäßigen Einsatz von Insektiziden sind mehrfach schon Resistenzentwicklungen beobachtet worden (Manandhar, 1997), wodurch die Entwicklung eines integrierten Managementkonzeptes für diesen Schädling um so dringlicher wird. Als Zielpflanzen im Beispiel sind Tomaten gewählt worden, da sie in den oben genannten Regionen einen beträchtlichen ökonomischen Wert besitzen und *H. armigera* regelmäßig große Schäden in den Pflanzungen verursacht.

3.1 Populationsdynamik, Umweltansprüche und Schadensschwellen des Schädlings

Der Lebenszyklus von *H. armigera* ist in Abb.1 mit den durchschnittlichen Entwicklungszeiträumen der einzelnen Stadien für tropische und subtropische Regionen dargestellt. Direkten Eingang in das Model finden die Larven- und Adultenstadien; das Ei- und Puppenstadium werden indirekt über die Regelformulierung, die die Dauer dieser Stadien einbezieht, berücksichtigt. Die Larve durchläuft sechs Stadien, wovon die Stadien III-VI die größten Schäden an der Frucht verursachen.

Unter den Abhängigkeiten zur physischen Umwelt ist für

das Schädlingsmanagementsystem der Einfluß von Starkregenfällen von entscheidender Bedeutung, da Starkregen eine hohe Mortalität in der Population von *H. armigera* zur Folge hat.

Die ökonomische Schadensschwelle ist für *H. armigera* auf Tomaten noch nicht ermittelt worden, allerdings für verschiedene andere Feldfrüchte, wie Weizen, Baumwolle und Kichererbsen. Aufgrund der Eigenschaften des Fuzzy-Modells können diese aber zunächst unter Berücksichtigung der Übertragung aus einem anderen System durch Sicherheitsfaktoren und Zugehörigkeitsfunktionen übernommen und im Zuge der Modellkalibrierung und -validierung besser angepaßt werden, sofern dies erforderlich wird.

3.2 Bekämpfungsmaßnahmen und Entwicklungsstadien der Wirtspflanze

Neben den üblichen Pestizidanwendungen wurden als wirksame und erprobte biologische Schädlingsbekämpfungsmaßnahmen folgende Methoden in das Entscheidungshilfesystem aufgenommen:

- *Trichogramma evanescens* - eiparasitoide Schlupfwespe;
- *Chrysopa carnea* - predatorisch lebende Larven einer Florfliege;
- Nuclear Polyhedrosis Virus (NPV) - pathogener Virus;
- *Bacillus thuringiensis* (B.t.)- pathogener Bacillus.

Die Entwicklungsstadien der Wirtspflanze lassen sich phälogologisch je nach System in verschiedene Makro-, Meso- und Mikro-stadien unterteilen; für das EHS genügt aber eine Unterscheidung in die vegetative und die generative Phase, da *H. armigera* Schäden an der Frucht zwar in jedem Entwicklungsstadium verursacht, die vegetative Entwicklung der Pflanze aber nicht beeinträchtigt.

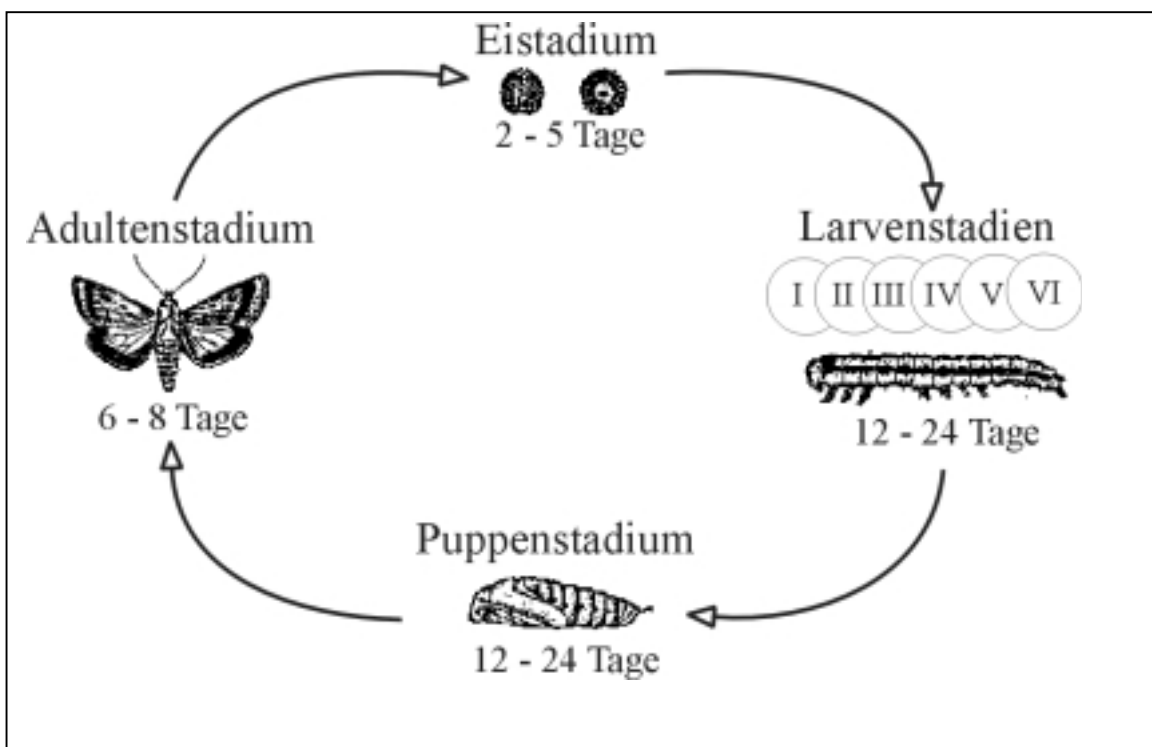


Abb.1: Lebenszyklus und Stadiumlängen von *Helicoverpa armigera* in tropischen und subtropischen Regionen

3.3 Entwicklung des Modells

Unter Berücksichtigung aller verfügbaren Informationen, von denen oben nur ein Bruchteil dargestellt ist, und der wirksamen Bekämpfungsmaßnahmen wurden folgende Eingangsvariablen für das Modell definiert:

- Entwicklungsstadium der Pflanze;
- Schädlingsdichte (Falter);
- Schädlingsdichte (Larvenstadien I-II);
- Schädlingsdichte (Larvenstadien III-VI);
- Schädlings-/Nützlings-Verhältnis;
- Wahrscheinlichkeit eines Regenfalls;
- Erntezeitpunkt;
- letzte Bekämpfungsmaßnahme.

Entscheidend für die Auswahl dieser Eingangsgrößen waren der Lebenszyklus von *H. armigera*, die Reaktionen auf verschiedene Umwelteinflüsse, die Fraßaktivitäten, d.h. das Schädigungspotential der verschiedenen Lebensstadien, die Entwicklungsstadien der Wirtspflanze und die Wirksamkeit der Schädlingskontrollmaßnahmen.

Die Ausgangsvariable des Modells ist schließlich die Empfehlung einer bestimmten Maßnahme. Abb.2 zeigt die Struktur des so entwickelten Modells.

Das Prinzip der unscharfen Mengen und deren Übertragung auf das hier dargestellte Problem sei nun an folgendem Beispiel erklärt: Die Eingangsvariable „Schädlingsdichte (Falter)“ wird mit den Attributen „niedrig“ und „hoch“ belegt und - wie in Abb.3 gezeigt - als Variable, bestehend aus zwei Fuzzy-Mengen, definiert. Diesen Fuzzy-Mengen liegen Zugehörigkeitsfunktionen (ZGF) zugrunde, die den Zugehörigkeitsgrad (oder auch Erfüllungsgrad) einer Variablenaus-

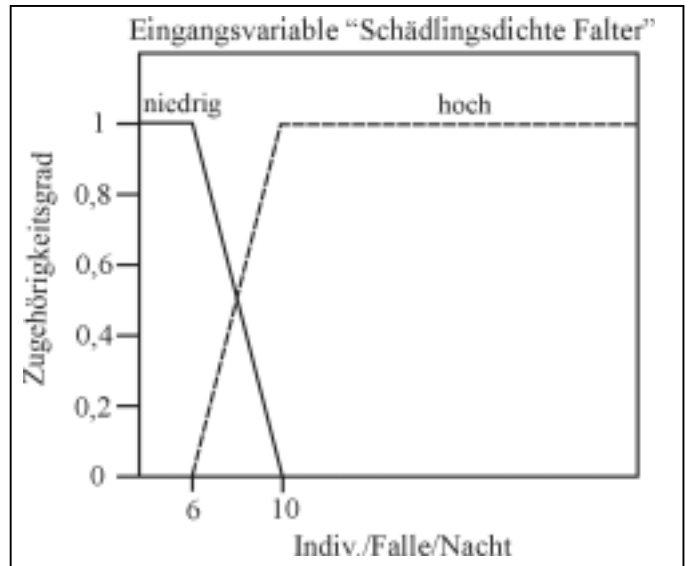
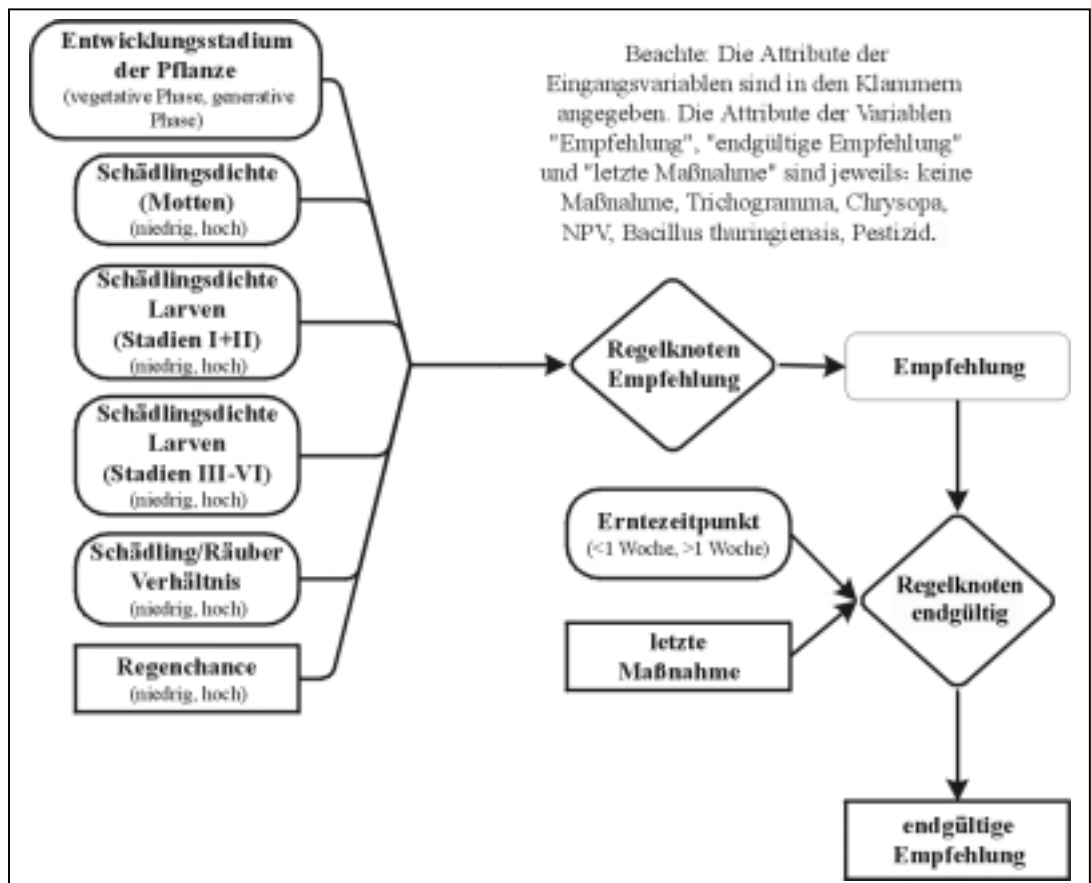


Abb.3: Attribute und Zugehörigkeitsfunktionen der Eingangsvariable „Schädlingsdichte (Falter)“

prägung zu den einzelnen Fuzzy-Mengen bestimmen. Der Wertebereich des Zugehörigkeitsgrades liegt zwischen 0 und 1. Die Definition der ZGF zu den beiden Attributsklassen erfolgt anhand der an verschiedenen Stellen (Prasad et al., 1993; Rosaiah und Reddy, 1995; Manandhar, 1997) ermittelten ökonomischen Schadensschwellenwerte, wobei die niedrigsten und höchsten Werte jeweils die Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen bilden. Als Eingabedaten dienen in diesem Fall die mittlere Anzahl der pro Nacht in Pheromonfallen gefangenen Falter.

Abb.2: Struktur des EHS für *Helicoverpa armigera* auf Tomaten. Die Eingangsvariablen in den gerundeten schwarzen Kästen sind Fuzzy-Mengen, diejenigen in eckigen sind „scharfe“, d.h. direkte, nicht fuzzifizierte Eingaben bzw. Ausgaben. Die Zwischenvariable ist dünner umrandet dargestellt



Zur Vereinfachung wird im weiteren für die Bezeichnung der Zugehörigkeitsfunktionen die Notation als Fuzzy-Zahlen gewählt (Bardossy und Duckstein, 1995). Dies bedeutet, daß eine trapezoide Fuzzy-Menge $A = (a_1, a_2, a_3, a_4)_R$ mit $a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a_4$ durch die Zugehörigkeitsfunktion beschrieben wird.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } x \leq a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & \text{wenn } a_1 < x \leq a_2 \\ 1 & \text{wenn } a_2 < x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3} & \text{wenn } a_3 < x \leq a_4 \\ 0 & \text{wenn } a_4 < x \end{cases}$$

Demnach wird die Fuzzy-Menge „niedrig“ im Beispiel in Abb.3 folgendermaßen notiert: Fuzzy-Menge „niedrig“ = $(0,0,6,10)_R$; die entsprechende Zugehörigkeitsfunktion lautet:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } 0 \leq x \leq 6 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3} & \text{wenn } 6 < x \leq 10 \\ 0 & \text{wenn } 10 < x \end{cases}$$

Jeder Wert für diese Eingangsvariable, der in das Modell eingegeben wird, wird nun „fuzzifiziert“, indem für jede unscharfe Menge der Zugehörigkeitsgrad ermittelt wird. Wird beispielsweise eine mittlere Falterdichte von 9 Faltern pro Nacht und Falle gemessen, so fällt dieser Wert in die Attributsmenge „niedrig“ mit einem Zugehörigkeitsgrad von 0,25 und in die Attributsmenge „hoch“ mit 0,75. Anders ausgedrückt bedeutet das, daß das Attribut „niedrig“ zu 25% erfüllt ist und das Attribut „hoch“ zu 75%.

Die gleiche Vorgehensweise ist auch auf die anderen Eingangsgrößen angewandt worden. Tab.1 listet die ZGF aller im Modell definierten unscharfen Mengen auf. Es wurden hierbei ausschließlich trapezoide, einseitig unscharfe Mengen verwendet, da sie am besten die Attributsmengen (jeweils nur zwei Attribute pro Menge) und Attributsausprägungen (Bereiche mit sicherer Zugehörigkeit, flankiert von unscharfen Rändern) abbilden.

Die so fuzzifizierten Eingangsdaten werden anschließend durch die Regelknoten ausgewertet, was schließlich über den Inferenz-Prozeß zur Entscheidungsfindung führt. Die Regeln sind von einfacher WENN...DANN-Struktur und beinhalten das verfügbare Wissen über Ökosystem, Populationsdynamiken und Schädlingsmanagement. Hierbei kann jede einzelne Regel noch mit Sicherheitsfaktoren belegt werden, die das Vertrauen des Experten in die Korrektheit der Regel ausdrücken. Die Grundlagen der einzelnen Regeln und damit des gesamten Schädlingsmanagementsystems sind in Tab.2 aufgeführt.

Beispielhaft sei nun eine der 116 Regeln des Regelknotens „Empfehlung“ angegeben:

Regel:

WENN {„Entwicklungsstadium“ ist „vegetative Phase“}
 UND {„Schädlingsdichte (Falter)“ ist „hoch“}
 UND {„Schädlingsdichte (Larvenstadien I-II)“ ist „niedrig“}
 UND {„Schädlingsdichte (Larvenstadien III-VI)“ ist „niedrig“}
 UND {„Schädlings/Nützlings-Verhältnis“ ist „niedrig“}
 UND {„Regenwahrscheinlichkeit“ ist „niedrig“}
 DANN {„Empfehlung“ „keine Maßnahme“} mit dem Sicherheitsfaktor 0,7.

Die Umsetzung dieser linguistischen Regel erfolgt über die in der Fuzzy-Theorie verwendeten Operatoren. Die in den Regeln benutzten UND-Verknüpfungen werden mit dem Minimum-Operator abgebildet, der der Schnittmenge in der klassischen Mengenlehre entspricht. Mathematisch läßt er sich folgendermaßen definieren:

$\mu_B(x) := \min\{\mu_{A_1}(x); \mu_{A_2}(x); \dots ; \mu_{A_n}(x)\}$ mit den Fuzzy-Mengen A_i , $i = 1 \dots n$, der Schnittmenge $B = A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n$ und μ_{A_i} bzw. μ_B als Zugehörigkeitsfunktionen der jeweiligen Fuzzy-Mengen (Bardossy und Duckstein, 1995). Zur Veranschaulichung kann man sagen, daß durch den Minimum-Operator die Größe der Schnittmenge der an einer Regel beteiligten Fuzzy-Mengen berechnet wird.

Da für eine gegebene Ausgangssituation meist mehr als eine Regel zur Anwendung kommt, müssen die Teilergebnisse, d.h. die Empfehlungen, durch die einzelnen Regeln zu einer

Tab.1: Eingangsgrößen, Attribute und Zugehörigkeitsfunktionen (ZGF) des EHS

Variable	Attribute	ZGF	Einheit
Entwicklungsstadium der Pflanze	vegetative Phase	$(0,0,30,45)_R$	Tage nach Pflanzung
	generative Phase	$(30,45,110,110)_R$	Tage nach Pflanzung
Schädlingsdichte (Falter)	niedrig	$(0,0,6,10)_R$	Individuen/Falle/Nacht
	hoch	$(6,10,100,100)_R$	Individuen/Falle/Nacht
Schädlingsdichte (Larvenstadien I-II)	niedrig	$(0,0,1,2)_R$	Individuen/10 Pflanzen
	hoch	$(1,2,10,10)_R$	Individuen/10 Pflanzen
Schädlingsdichte (Larvenstadien III-VI)	niedrig	$(0,01,2)_R$	Individuen/10 Pflanzen
	hoch	$(1,2,10,10)_R$	Individuen/10 Pflanzen
Schädling/Nützlings-Verhältnis	niedrig	$(0,0,2,3)_R$	---
	hoch	$(2,3,10,10)_R$	---
Regenchance	niedrig	(keine Fuzzy-Menge)	---
	hoch	(keine Fuzzy-Menge)	---

Tab.2: Grundlagen des Schädlingsmanagementsystems

1. Allgemeine Regeln

Eine Behandlung ist <u>sicherlich erforderlich</u> , wenn	⇒ die Schädlingsdichte im generativen Entwicklungsstadium der Pflanze <u>hoch</u> ist.
Eine Behandlung <u>sollte bedacht</u> werden, wenn	⇒ die Schädlingsdichte im vegetativen Entwicklungsstadium hoch ist. ⇒ die Schädlingsdichte im generativen Entwicklungsstadium niedrig ist.

2. Regeln für die Bekämpfungsmaßnahmen

Trichogramma spp.	⇒ ist die erste Option zur Bekämpfung der Eier.
Chrysopa carnea	⇒ ist die erste Option zur Bekämpfung der Eier <u>und</u> der Larvenstadien I-II.
Nuclear Polyhedrosis Virus (NPV)	⇒ ist die erste Option zur Bekämpfung der Larvenstadien I-II.
Bacillus thuringiensis	⇒ ist die erste Option zur Bekämpfung der Larvenstadien III-V.
Pestizide	⇒ sind die erste Option zur Bekämpfung der Larvenstadien I-II <u>und</u> der Stadien III-V.

3. Einfluß des Regens und der Nützlingsdichte

Die Regenwahrscheinlichkeit	⇒ reduziert die Sicherheit einer nicht sicherlich notwendigen Behandlung, wenn sie hoch ist, und kann sogar zu einer Empfehlung „keine Maßnahme“ führen.
Das Schädling/Nützlings-Verhältnis	⇒ reduziert ebenfalls die Sicherheit einer nicht notwendigen Behandlung, wenn es niedrig ist, und hilft zu entscheiden, ob Pathogene oder Parasitoide/Räuber eingesetzt werden sollen. Im Falle eines geringen Verhältnisses würden die Parasitoide/Räuber bevorzugt.

einigen, gemeinsamen Fuzzy-Menge akkumuliert werden. Dies geschieht mit dem Maximum-Operator, der der Vereinigungsmenge der klassischen Mengenlehre und dem ODER der Logik entspricht. Formuliert wird er analog dem Minimum-Operator wie folgt (Bardossy und Duckstein, 1995):

$\mu_B(x) := \max\{\mu_{A_1}(x); \mu_{A_2}(x); \dots; \mu_{A_n}(x)\}$ mit den Fuzzy-Mengen A_i , $i = 1..n$, der Vereinigungsmenge $B = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n$ und μ_{A_i}/μ_B als Zugehörigkeitsfunktionen der jeweiligen Fuzzy-Mengen.

Im letzten Schritt muß die unscharfe Ausgabemenge wieder defuzzifiziert werden, d.h. in eine klare Empfehlung überführt werden. Dies geschieht hier mittels der Maximalhöhenmethode, die dasjenige Attribut der Ausgabemenge als letztendliche Empfehlung wählt, das den höchsten Erfüllungsgrad besitzt. Somit wird das Verfahren gewählt, das unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Datenlage und der Regeln das größte Vertrauen auf Erfolg genießt.

3.4 Fallbeispiel

Die Vorgehensweise soll an einem Beispiel veranschaulicht werden. Es wird angenommen, daß bei einer Bestandsaufnahme eine Dichte der Falter von 12, der Larven im Stadium I-II von 1,4 und der in den Stadien III-VI von 0,8 sowie ein Schädling/Nützlings-Verhältnis von 2,7 ermittelt wird. Die Regenwahrscheinlichkeit wird als gering eingeschätzt. Die Tomaten wurden 40 Tage zuvor gepflanzt, die letzte Kontrollmaßnahme war eine Freisetzung von Trichogramma-Parasitoiden, und der Erntezeitpunkt ist sicherlich noch über eine Woche entfernt.

Dieses Beispiel stellt eine recht komplexe Situation dar, denn der Entwicklungszustand der Pflanzen befindet sich in der Übergangsphase vom vegetativen zum generativen Stadium, und die Dichte der Falter und der jüngeren Larven

liegt im Bereich der übertragenen ökonomischen Schadensschwelle. Auch das Verhältnis von Schädling zu Nützlingen ist in einem Bereich, in dem man nicht sicher sein kann, ob die natürlichen Feinde in ausreichender Zahl zur Eindämmung des Schädlings vorhanden sind. Bei solch einer komplexen Ausgangssituation fällt es vor allem den Nicht-Experten schwer, eine Entscheidung über eine eventuell zu treffende Maßnahme zu fällen, gerade auch, wenn zwischen mehreren möglichen Optionen eines Integrierten Pflanzenschutzprogrammes entschieden werden muß.

Die Anwendung des EHS auf dieses Beispielszenario würde zu einer Empfehlung der Freisetzung von *Chrysopa carnea*-Larven führen, wie nun anhand der vier notwendigen Schritte der Inferenz, d.h. der Entscheidungsfindung im System, gezeigt wird (Bardossy und Duckstein, 1995).

Inferenz-Schritt 1: Zugehörigkeitsgrade der Eingabedaten zu den Attributsmengen

Tab.3 zeigt, welche Zugehörigkeitsgrade die o.g. Eingangsdaten zu den Attributsmengen erreichen, d.h. in anderen Worten, wie die Prämissen der Regeln erfüllt werden.

Inferenz-Schritt 2: Aggregation der Zugehörigkeitsgrade

Zunächst werden die Zugehörigkeitsgrade (= Erfüllungsgrade) der Eingabedaten zu den Prämissen der Regeln im ersten Regelknoten „Empfehlung“ anhand der zur Anwendung kommenden Regeln aggregiert. In diesem Fall sind dies 19 Regeln, deren Erfüllungsgrade jeweils mit dem Minimum-Operator zu einer Gesamtkompatibilität der Eingabedaten mit der Regel aggregiert werden. Tab.4 listet die relevanten Regeln und Tab.5 die aggregierten Zugehörigkeitsgrade (= Kompatibilitäten der Eingangsdaten zu den Regeln) für diese Regeln auf.

Inferenz-Schritt 3: Modifikation der Zwischenvariable „Empfehlung“

Tab.3: Beispiel: Eingabedaten und Zugehörigkeitsgrade zu den Attributmengen

Eingangsvariable	Eingabedaten	Zugehörigkeitsgrad μ
Entwicklungsstadium der Pflanzen	40 Tage	$\mu_{(\text{vegetative Ph.})} = \frac{1}{3}$ $\mu_{(\text{generative Ph.})} = \frac{2}{3}$
Schädlingsdichte (Motten)	12 Individuen /Falle/Nacht	$\mu_{(\text{niedrig})} = 0$ $\mu_{(\text{hoch})} = 1$
Schädlingsdichte (Stadien I-II)	1,4 Individuen/ 10 Pflanzen	$\mu_{(\text{niedrig})} = 0,6$ $\mu_{(\text{hoch})} = 0,4$
Schädlingsdichte (Stadien III-VI)	0,6 Individuen/ 10 Pflanzen	$\mu_{(\text{niedrig})} = 1$ $\mu_{(\text{hoch})} = 0$
Schädlings-/ Nützlings-Verhältnis	2,7	$\mu_{(\text{niedrig})} = 0,3$ $\mu_{(\text{hoch})} = 0,7$
Regenwahrscheinlichkeit	niedrig	$\mu_{(\text{niedrig})} = 1$
letzte Maßnahme	Trichogramma	$\mu_{(\text{Trichogramma})} = 1$
Erntezeitpunkt	70 Tage	$\mu_{(> 1 \text{ Woche})} = 1$ $\mu_{(< 1 \text{ Woche})} = 0$

In diesem Schritt wird die Zwischenvariable „Empfehlung“ anhand der 19 aggregierten Kompatibilitätsmaße aus Schritt 2 modifiziert, wobei allerdings nur die höchsten Kompatibilitäten jedes einzelnen Attributes (d.h. der Empfehlungen) von Bedeutung sind. Der Erfüllungsgrad der Empfehlungen ist identisch mit der aggregierten Regelkompatibilität in Tab.3.

Tab.4: Ansprechende Regeln des Regelknotens „Empfehlung“ aus dem Textbeispiel (die wichtigsten 5 von insg. 19; Erläuterungen zu den Entwicklungsstadien und Empfehlungen siehe Text)

Regel	Entwicklungsstadium	Falter	Stadien I+II	Stadien III-VI	Schädling/ Nützlich	Regen	Operator	Sicherheitsfaktor	Empfehlung
R1	veget.	hoch	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	UND	0.7	keine Maßnahme
R13	gener.	hoch	niedrig	niedrig	hoch	niedrig	UND	1,0	Trichogramma
R14	gener.	hoch	niedrig	niedrig	hoch	niedrig	UND	0.9	Chrysopa
R18	gener.	hoch	hoch	niedrig	hoch	niedrig	UND	0.9	NPV
R19	gener.	hoch	hoch	niedrig	hoch	niedrig	UND	0.9	B.t.

Tab.5: Beispiel: Aggregation der Zugehörigkeitsgrade im Regelknoten „Empfehlung“

Regel	Zugehörigkeitsgrade zu den Attributmengen μ							Schlußfolgerung	
R_i	Entwicklungsstadium $\equiv \mu_1$	Falter $\equiv \mu_2$	Stadien I-II $\equiv \mu_3$	Stadien III-VI $\equiv \mu_4$	Schädl./ Nützlich $\equiv \mu_5$	Regen $\equiv \mu_6$	Sicherheitsfaktor $\equiv CF_{R_i}$	Empfehlung	aggregierte Kompatibilität \equiv $\mu_{R_i} = \min\{\mu_{1(R_i)}, \dots, \mu_{6(R_i)}\} * CF_{R_i}$
R1	0,33	1	0,6	1	0,3	1	0.7	keine Maßnahme	0,21 (= 0,3 * 0,7)
R13	0,66	1	0,6	1	0,7	1	1,0	Trichogramma	0,6 (= 0,6 * 1)
R14	0,66	1	0,6	1	0,7	1	0.9	Chrysopa	0,54 (= 0,6 * 0,9)
R18	0,66	1	0,4	1	0,7	1	0.9	NPV	0,36 (=0,4 * 0,9)
R19	0,66	1	0,4	1	0,7	1	0.9	thuringiensis	0,36(= 0,4 * 0,9)

Inferenz-Schritt 4: Aggregation der Teilresultate

Die Aggregation der fünf wichtigsten Teilresultate (der Regeln 1, 13, 14, 18 und 19; diejenigen Regeln, die für die fünf verschiedenen Behandlungsmethoden den jeweils höchsten Erfüllungsgrad ergeben) zu einer endgültigen Modifizierung der Zwischenvariable „Empfehlung“ erfolgt nun mit dem Maximum-Operator und entspricht der Vereinigungsmenge der Teilergebnisse.

Die Schritte 3 und 4 werden im zweiten Regelknoten „endgültig“ wiederholt und damit die Modifikation der Ausgangsvariable „endgültige Empfehlung“ erzielt. Das Ergebnis ist graphisch in Abb.4 dargestellt.

Durch die Maximalhöhenmethode bei der Defuzzifizierung wird letztlich die oben genannte Behandlungsmaßnahme empfohlen, wie man in Abb.4 nachvollziehen kann. Diese Empfehlung ist nun diejenige, die unter den vorhandenen Bekämpfungsoptionen, der Ausgangssituation und den gegebenen Unsicherheiten in der Datenlage das größte Vertrauen auf Erfolg genießt.

4 Bewertung

Die Entwicklung eines EHS mittels eines regelbasierten Fuzzy-Modells hat gezeigt, daß es möglich ist, die Struktur eines integrierten Pflanzenschutzsystems als regelbasiertes Fuzzy-Modell darzustellen und das Expertenwissen als Regelbasis zu formulieren. Ebenfalls erwies sich die Quantifizierung der Unsicherheiten der Daten und des Wissens als möglich, indem Fuzzy-Mengen und Sicherheitsfaktoren verwendet wurden und somit die Unsicherheiten formal verarbeitet werden konnten. Diese Vorgehensweise führt zu

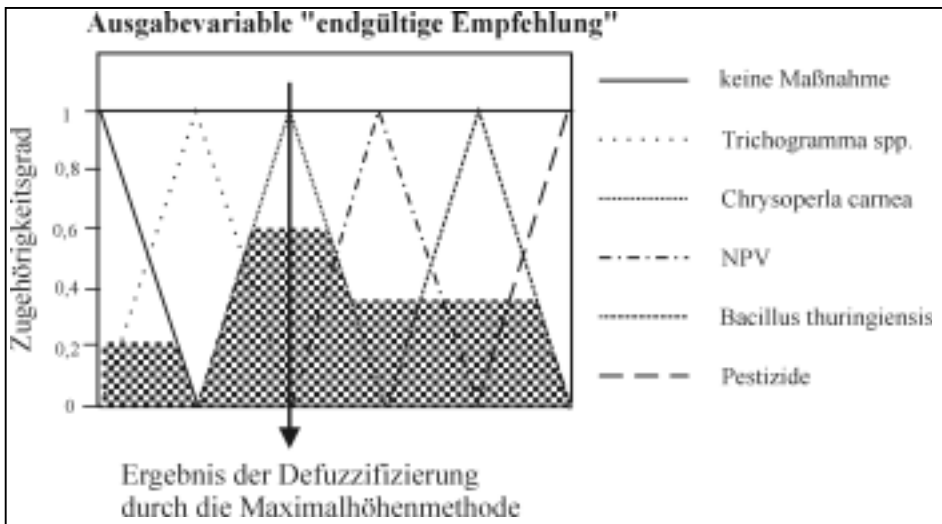


Abb.4:
Modifizierte Ausgangsvariable
"endgültige Empfehlung"

einem System, das in jedem Fall eine Empfehlung entsprechend den zugrundeliegenden Regeln gibt. Das gilt auch für Situationen, in denen ein menschlicher Entscheidungsträger zögern würde. Dadurch könnte das EHS sowohl für Experten als auch Laien als Hilfe für schwierige Entscheidungen beim integrierten Pflanzenschutz dienen.

Aufgrund dieser Eigenschaften ist dieses System auch sehr gut für den Einsatz in den tropischen und subtropischen Ländern geeignet, in denen aufgrund der ökologischen und ökonomischen Ausgangssituation ein integriertes Pflanzenschutzsystem die beste Lösung für eine nachhaltige landwirtschaftliche Produktion ist. Hinzu kommt, daß wegen des geringeren Technisierungsgrades in diesen Ländern die Verfügbarkeit und Beschaffung von Daten einige Probleme aufwirft. Hier empfiehlt sich das EHS durch seinen geringen Datenbedarf und auch die Fähigkeit, unsichere und qualitative Daten und Informationen zu verarbeiten oder auch Ergebnisse und Daten aus anderen Regionen zu übernehmen.

Letztendlich dient es auch als Mittel zur Verbreitung des Expertenwissens, das in Forschungsvorhaben gewonnen wird oder aber schon regional traditionell entwickelt wurde.

5 Ausblick

Mit den Fuzzy-Methoden lassen sich offenbar vielseitige Werkzeuge entwickeln, die in der Praxis gute Dienste im Schädlingsmanagement in den Tropen und Subtropen leisten können. Allerdings müssen sich diese Werkzeuge noch in Feldversuchen bewähren. Dies ist für die nächsten Jahre geplant.

Aufgrund der technischen Machbarkeit lassen sich einige Erweiterungen oder ähnliche Nutzungen des Systems ableiten. So ist eine Erweiterung hin zu einem multiplen Schädlingsmanagement durchaus denkbar oder aber auch die Entwicklung eines Werkzeugs zur Risikoabschätzung von Pestizideinsätzen für Mensch und Umwelt.

6 Literatur

- BARDOSSY, A., Duckstein, L. (1995): Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems. CRC Press, Boca Raton.
 MANANDHAR, D. (1997): Notorious Worm in IPM. NARC Newsletter 4(1).

NÖRTERSHEUSER, P., Richter, O., Schmider, F. (1993): Beschreibung des Wirkungsverlaufes von Herbiziden mit mathematischen Modellen. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz 100 (1): 75-89.

PRASAD, V. D., Rambabu, L., Reddy, G. P. (1993): An action threshold for *Helicoverpa armigera* Hb. Based on pheromone trap catches in cotton. Indian Journal of Plant Protection 21 (1): 17-18.

ROSAIAH, B., Reddy, A. S. (1995): Estimation in yield losses in MCU 5 cotton due to the attack of *Helicoverpa armigera* (Hubner) in NSP area of Andhra Pradesh. Indian Journal of Plant Protection 23 (2): 201-205.

SÖNDGERATH, D., Müller-Pietralla, W. (1996): A model for the development of the cabbage root fly (*Delia radicum* L.) based on the extended Leslie model. Ecological Modelling 91: 67-76.

Danksagung

An dieser Stelle gilt mein Dank Prof. Dr. Andreas Herrmann für sein Engagement bezüglich der Auslandsarbeit in Nepal und der Volkswagenstiftung für die finanzielle Unterstützung des gesamten Projektes „Develop IPM Nepal“.

Ein Entscheidungshilfesystem für IPM von *Helicoverpa armigera* in den Tropen und Subtropen auf Basis eines regelbasierten Fuzzy-Modells

(H. Apel, A. Herrmann, O. Richter)

Zusammenfassung

Bedarfsorientierter Pflanzenschutz und besonders Integrierte Pflanzenschutzprogramme stellen hohe Anforderungen an den Anwender: Ein fundiertes Wissen über die Ökologie und Populationsdynamiken der Schädlinge und Wirtspflanzen sind ebenso erforderlich, wie ein Monitoring der Schädlingsdichten, Entwicklungsstadien der Wirtspflanzen und relevanter Umweltparameter. Zur Unterstützung der Anwender ist ein Entscheidungshilfesystem entwickelt worden, das auf einem regelbasierten Fuzzy-Modell fundiert. Durch die Eigenschaften dieser Modellierungsmethode konnte ein Modell entwickelt werden, das es ermöglicht,

qualitative Informationen wie Expertenwissen formal zu verarbeiten, Unsicherheiten in der Datenerfassung und im Wissen und auch die räumliche Variabilität im Feldmaßstab quantitativ zu berücksichtigen. Diese Eigenschaften machen dieses Entscheidungshilfesystem besonders interessant für die Länder der Dritten Welt, in denen einerseits Integrierte Pflanzenschutzprogramme dringend von Nöten sind und andererseits die Probleme der Datenerfassung und -qualität die Anwendbarkeit deterministischer Modelle deutlich einschränken. Aufgrund dessen wurde das Modell anhand eines Beispiels aus der Landwirtschaft Nepals und einem der dortigen Hauptschädlinge (*Helicoverpa armigera*) entwickelt.

Stichworte: Entscheidungshilfesystem (EHS), regelbasiertes Fuzzy-Modell, Integrierter Pflanzenschutz, Schädlingsbekämpfung, *Helicoverpa armigera*

A Decision Support System for Integrated Pest Management of *Helicoverpa armigera* in the Tropics and Subtropics by means of a rule-based Fuzzy-Model (H. Apel, A. Herrmann, O. Richter)

Summary

Integrated Pest Management Programs raise high demands to the user: A profound knowledge about ecology and popu-

*lation dynamics of the pests and the host plants are required as well as a monitoring of the density of the pests, the development stage of the plants and of relevant environmental parameters. In order to support the users in their quest a Decision Support System has been developed based on a rule-based Fuzzy-Model. The use of this approach made it possible to incorporate qualitative information's like expert knowledge formally, to consider the uncertainties encountered in data acquisition and knowledge about the functionality of the ecosystem as well as the spatial variation of the environment at field scale and to quantify all of these uncertainties. These characteristics are excellently suitable for the agricultural conditions in the Third World. The call for an Integrated Pest Management is very urgent in these regions, but the problems regarding data acquisition and quality cause a major problem to the application of deterministic model's. For this reason the model has been developed at an example from Nepal, where *Helicoverpa armigera* causes severe damage in several economical important crops.*

Key words: Decision Support System (DSS), Rule-based Fuzzy-Model, Integrated Pest Management (IPM), *Helicoverpa armigera*

Dipl.-Geoökol. Heiko Apel ist Doktorand am Institut für Geographie und Geoökologie der TU Braunschweig (Tel.: 0531-391 5918, Fax: 0531-391 8170, e-mail: h.apel@tu-bs.de).

Prof. Dr. Andreas Herrmann und Prof. Dr. Otto Richter sind am Institut für Geographie und Geoökologie der TU Braunschweig tätig (Tel.: 0531-391 5606 bzw. 5628, Fax: 0531-391 8170).