



Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5622

**5. Treffen des AK
Werkzeuge für Simulation
und Modellbildung in
Umweltanwendungen**

2.3. – 3.3.1995, Braunschweig

H. B. Keller, R. Grützner, W. Paul (Hrsg.)

Institut für Angewandte Informatik
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren

September 1995

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 5622

5. Treffen des AK

Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umweltanwendungen

**2.3. - 3.3.1995
Braunschweig**

Hubert B. Keller, Rolf Grützner¹⁾, Wolfgang Paul²⁾ (Hrsg.)

**Institut für Angewandte Informatik
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren**

¹⁾ Universität Rostock, Fb Informatik

²⁾ Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1995

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

ISSN 0947-8620

Zusammenfassung:

Dieser Bericht stellt die Beiträge des 5. Treffens des Arbeitskreises "Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen" des Fachausschuß 4.6, "Informatik im Umweltschutz", der Gesellschaft für Informatik (GI) vom 2.3. - 3.3.1995 in Braunschweig in schriftlicher Form dar.

5th Meeting of the WG Tools for Simulation and Modelling in Environmental Applications

Abstract:

This report contains the papers of the 5th meeting of the working group " Tools for Simulation and Modelling in Environmental Applications", of the section 4.6, "Computer Science for Environmental Protection", of the Society for Computer Science (GI), which took place at Braunschweig on 2nd - 3rd of march in 1995.



Vormerkungen

Im Rahmen des Umweltschutzes stellt die Modellbildung und Simulation eine Problemlösungsmethode von wachsender Bedeutung dar. Durch die Entwicklung und die Anwendung moderner Methoden und Werkzeuge der Informatik hat sich in den letzten Jahren ihr Einsatzbereich erheblich vergrößert. Damit ist es möglich, den Umweltzustand sowie seine Veränderungen zu untersuchen und vorherzusagen. Auch die Einwirkungen von Produktionsprozessen und anderen menschlichen Aktivitäten sowie die Wirksamkeit von Umweltschutzmaßnahmen können mit dieser Problemlösungsmethode erfaßt bzw. abgeschätzt werden.

Allerdings werden derartige Untersuchungen durch die Komplexität der Systeme und das häufig noch fehlende Wissen über Systemabläufe, Zusammenhänge und Wirkungen erheblich erschwert. Unsicheres Wissen und der Umgang mit ihm gehört somit zum Alltag des Modellierers und Simulationisten im Umweltbereich. *Fuzzy-Logik* und *qualitative Simulation* sind Ansätze, die in diesem Zusammenhang wesentlich sein können. Sie standen neben anderen methodischen Ansätzen deshalb im Mittelpunkt des 5. Treffens des Arbeitskreises "Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umweltschutzanwendungen" der GI-Fachgruppe 4.6.1: Informatik im Umweltschutz.

Durch zwei eingeladene Vorträge (Prof. Kruse und Prof. Möller) wurden die Bedeutung der Fuzzy-Ansätze im Umweltbereich unterstrichen, sowie die Möglichkeiten und Grenzen der Ansätze dargestellt.

In 15 Vorträgen wurden neben Fuzzy-Grundlagen und Anwendungen weitere wesentliche Themen vorgetragen und diskutiert. Mit großem Interesse erfolgten auch wieder Vorführungen von Softwarewerkzeugen durch verschiedenste Entwicklerfirmen. Diese Gesprächsbasis zwischen Entwicklern und Anwendern im Rahmen des Arbeitstreffens bewährt sich stets aufs Neue. Das gewachsene Interesse an den Fragen dieses Teilgebietes der Umweltinformatik zeigte sich diesmal auch an der sehr stark gestiegenen Teilnehmerzahl. Erstmals konnte aus zeitlichen Gründen nicht jedem Vortragswunsch entsprochen werden.

Das Treffen fand in der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig statt. Herr Prof. W. Paul hat als örtlicher Organisator für die erfolgreiche Durchführung in einer ruhigen und produktiven Arbeitsumgebung gesorgt. Dafür sei ihm ganz herzlich gedankt. Gedankt sei auch dem Forschungszentrum Karlsruhe und Herrn Dr. H.B. Keller für die erneute Bereitschaft, die Beiträge des Treffens erneut in den Berichten des Forschungszentrums zu veröffentlichen.

Es ist geplant, das nächste Treffen im Januar 1996 durchzuführen.

Prof. Dr. habil. R. Grützner
Leiter des Arbeitskreises 5

Inhaltsverzeichnis

1	M. Sonnenschein: Zeitdiskrete und ereignisdiskrete, verteilte Simulation individuenorientierter Modelle	9
2	J. Ortmann: Grundlagen und Anwendungen individuenorientierter Modellierung im Umweltbereich	17
3	J. Alex: Dynamische Simulation der Abwasserreinigung	27
4	P. W. Gräber: Parallele Simulation von Grundwasserströmungen	39
5	K. Chr. Ranze: Erweiterung des Expertensystems EXCEPT durch unscharfe Modellierung	51
6	J. Gebhardt: Possibilistic Graphical Models	61
7	W. Paul: Risikoanalyse mit Monte-Carlo- und Fuzzy-Methoden am Beispiel der Nitratauswaschung unter Grünland	71
8	R. Hohmann, E. Möbus: Qualitative Simulation mit QualSim	83
9	G. Lutze, R. Wieland: Habitatsmodelle im Rahmen der dynamischen Landschaftsmodellierung	95
10	N. Grebe: Modellierung der Verschmutzung für das Regionalplanungsmodell RegioPlan⁺	107
11	M. Ruge: Szenariotechnik und Informationsvisualisierung	117
12	Teilnehmerliste	133
13	GI-Fachgruppe 4.6.1 Informatik im Umweltschutz	137
14	Arbeitskreis 'Werkzeuge für die Simulation und Modellbildung'	139
15	Bisherige Veröffentlichungen	141

Zeitdiskrete und ereignisdiskrete verteilte Simulation individuen-orientierter Modelle

Michael Sonnenschein, Helmut Lorek

OFFIS (Oldenburger Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Informatik-Werkzeuge und -Systeme)

Westerstr. 10-12, D-26121 Oldenburg

Email: {sonnenschein, lorek}@informatik.uni-oldenburg.de

Zusammenfassung

Individuen-orientierte Modelle erfordern zu ihrer Validierung und Analyse rechenzeitaufwendige Simulationen. Zu deren Durchführung können MIMD-Parallelrechner oder verteilte Systeme eingesetzt werden, wenn eine geeignete Parallelisierung des Simulationsverfahrens durchgeführt wird. In diesem Bericht werden Untersuchungen über zeitdiskrete und ereignisdiskrete verteilte Simulationen solcher Modelle vorgestellt. Dabei soll insbesondere ein Eindruck von den prinzipiellen Schwierigkeiten solcher diskreten, verteilten Simulationsmethoden vermittelt werden. Es ist keineswegs trivial, daß ein reales verteiltes System effizient verteilt simuliert werden kann.

1 Individuen-orientierte Modellbildung

Individuen-orientierte Modelle bekommen eine zunehmende Bedeutung in der Ökologie und Populationsbiologie [5, 6]. Im Gegensatz zu klassischen Modellierungsmethoden, die auf Biomassen und Stoffflüssen und somit einer globalen Systemsicht basieren, erfolgt bei der individuen-orientierten Methode eine Spezifikation des Verhaltens einzelner Individuen, aus denen sich das System zusammensetzt, und somit eine Beschreibung des Modells aus einer lokalen Systemsicht.

Die einzelnen Individuen eines individuen-orientierten Modells reagieren zu diskreten Zeitpunkten auf

- Individuen der gleichen Art (beispielsweise Konkurrenz),
- Individuen anderer Arten (beispielsweise Räuber oder Beute),
- eine Umgebung bzw. globale Ressourcen.

Individuen können über „persönliche“ Attribute wie etwa Alter, Gewicht oder eine Position im Raum verfügen. Ferner können sie im Laufe der Simulation des Modells geboren werden oder sterben. Das Verhalten des Gesamtsystems wird in einem individuen-orientierten Modell als Summe der Verhaltensweisen der einzelnen Individuen dargestellt.

Die wesentlichen Vorteile dieses Modellierungsansatzes gegenüber einer klassischen Methode lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Attribute eines Individuums können sein Verhalten im Modell beeinflussen, d. h. Unterschiede zwischen Individuen werden modellierbar.
- Lokale Interaktion aufgrund räumlicher Nähe von Individuen kann modelliert werden.
- Die Wirkung einer Menge von Individuen ist (etwa durch Konkurrenz) nicht notwendig additiv.
- Modelle können leicht erweitert werden.

Diesen Vorteilen stehen allerdings auch einige nicht zu übersehende Nachteile gegenüber:

- Zur Modellierung sind genaue Kenntnisse über das Verhalten der einzelnen Individuen erforderlich.
- Eine mathematische Analyse eines solchen Modells ist so gut wie unmöglich. Aussagen über das Modell können nur durch Simulationen erzielt werden.
- Es ist prinzipiell fraglich, ob ein System lediglich die Summe seiner Teile und deren Interaktion ist (reduktionistische Sichtweise).

2 Verteilte Simulation

Die Individuen eines Modells werden auf einem Rechner meist durch Prozesse oder aktive Objekte implementiert. Die Analogie dieser Form der Modellbildung zur objektorientierten Programmierung ist offenkundig und wird vielfach bei der Implementierung der Modelle genutzt. Andere Ansätze zur individuen-orientierten Modellbildung, etwa unter Verwendung von Petrinetzen [17], befinden sich noch im Erprobungsstadium.

Zur Validierung eines individuen-orientierten Modells und zur Ableitung von Prognosedaten sind umfangreiche Simulationsläufe erforderlich. Insbesondere ist eine interaktive Modellvalidierung anhand eines in Realzeit oder im Zeitraffer animierten Simulationslaufs sehr von Vorteil. Zur Simulation individuen-orientierter Modelle sind daher sehr leistungsfähige Rechner erforderlich. In erster Linie sind hier derzeit Multicomputer und verteilte Systeme, d.h. MIMD-Parallelrechner oder Cluster von Workstations, von Interesse, auf denen ein Modell verteilt simuliert werden kann. Der Vorteil von Multicomputern besteht darin, daß mit relativ geringem Kostenaufwand eine hohe Rechenleistung erzielt werden kann und daß die Leistung solcher Systeme skalierbar ist. Ihr Nachteil besteht in der erheblich aufwendigeren Programmierung, die auf der explizit erforderlichen Kommunikation und Synchronisation zwischen aktiven Objekten bzw. Prozessen auf den einzelnen Knoten des Parallelrechners bzw. des verteilten Systems beruht. Als Software-Plattform wird hierzu meist die PVM (Parallel Virtual Machine) [4] verwendet, die für zahlreiche Parallelrechner und verteilte Systeme verfügbar ist.

Zur verteilten Simulation von individuen-orientierten Modellen können, wie auch bei der sequentiellen Simulation diskreter Modelle, zwei wesentliche verschiedene Ansätze verwendet werden. Im zeitdiskreten Ansatz erfolgen Zustandsübergänge eines Individuums zu periodisch bestimmten, diskreten Zeitpunkten. Alle Individuen verändern ihren Zustand jeweils zu gleichen Zeitpunkten in der simulierten Zeit.

In der ereignisdiskreten Simulation dagegen erfährt ein Individuum einen Zustandsübergang, wenn in seiner Umgebung ein Ereignis auftritt, durch das es betroffen ist. Ein daraus resultierender Zustandsübergang des Individuums kann wieder neue Ereignisse auslösen, die andere

Individuen betreffen. Zustandsübergänge verschiedener Individuen erfolgen damit asynchron. Die Zustandsübergänge eines einzelnen Individuums müssen durchaus nicht äquidistant in der Zeit über die gesamte Zeitspanne der Simulation liegen.

Das generelle Problem der verteilten diskreten Simulation besteht nun darin, die Individuen so auf die Knoten des verteilten Systems zu verteilen, daß durch die Verteilung eine Beschleunigung der Simulation erzielt wird, die in etwa linear zur Anzahl der eingesetzten Knoten des verteilten Systems verläuft. Eine mögliche Verteilung eines Modells wird in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt.

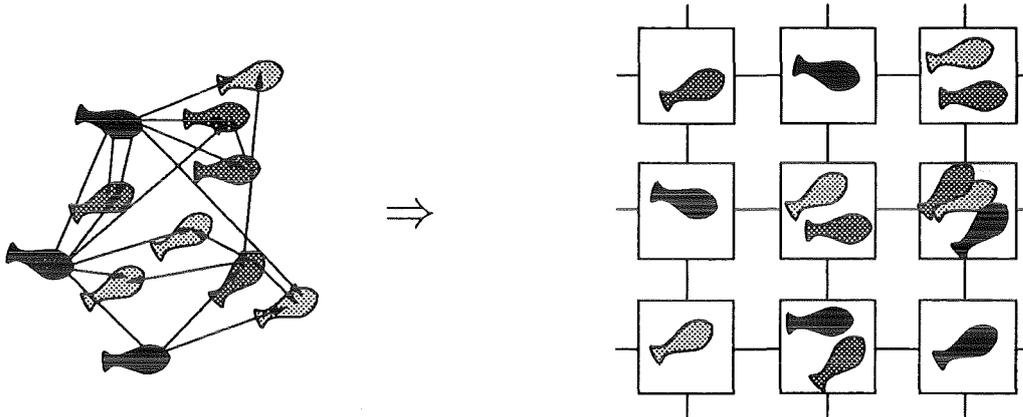


Abbildung 1: Verteilung eines individuenorientierten Modells

Zum Erreichen dieses Ziels sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

- eine gleichmäßige Lastverteilung auf die Knoten des verteilten Systems,
- ein geringer Overhead durch Kommunikation im verteilten System und
- eine weitgehende Vermeidung von Idle-Zeiten durch Synchronisationsmaßnahmen

Dabei müssen insbesondere die Wechselwirkungen zwischen den Individuen berücksichtigt werden. Bereits dies weist darauf hin, daß verschiedene prinzipielle und technische Schwierigkeiten mit der Verteilung eines diskreten Simulationsmodells verbunden sind.

3 Zeitdiskrete verteilte Simulation

Im Rahmen des OFFIS-Projekts Ecomind wurde exemplarisch für eine zeitdiskrete individuenorientierte Simulation das Huth-Wissel-Modell [7] des Bewegungsverhaltens eines Fischschwarms untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in [11] veröffentlicht. Es zeigte sich, daß eine für den Verlauf der Simulation statische (und zufällige) Zuordnung von Individuen (hier Fischen) zu Knoten des simulierenden verteilten Systems (hier ein Transputersystem) für kleine Anzahlen von Knoten durchaus sinnvoll ist. Es konnte eine Beschleunigung der Simulationszeiten um den Faktor 17 auf 20 Knoten bei genügend großer Anzahl an Individuen gemessen werden. Diese Messungen stimmen erstaunlich genau mit theoretischen Performance-Analysen des Simulationsmodells überein [12].

Bei großen Anzahlen von Knoten des verteilten Systems dagegen muß eine raumbezogene, dynamische Zuordnung der Individuen zu den Knoten erfolgen, da bei einer statischen Zuordnung vor jedem Simulationsschritt eine Kommunikation zwischen allen Knoten erforderlich ist. Bei dieser Kommunikation werden Zustände der simulierten Individuen, etwa deren Positionen im Raum, ausgetauscht, die zur Berechnung der Verhaltensweise bzw. der Zustandsübergänge im folgenden Simulationsschritt erforderlich sind. Diese „Alle-mit-Allen“-Kommunikation wird bei großen Knotenzahlen eines verteilten Systems so aufwendig, daß keine akzeptablen Beschleunigungswerte mehr erzielt werden können.

Zur dynamischen Zuordnung von Individuen zu Knoten kann genutzt werden, daß Individuen im Modell nur mit anderen Individuen einer räumlich lokalen Nachbarschaft interagieren. Eine Zuordnung von benachbarten Individuen zu benachbarten Knoten des verteilten Systems ermöglicht es, die Kommunikation eines Knotens auf seine lokale Nachbarschaft in der Topologie des verteilten Systems einzuschränken. Hierdurch ist es möglich, auch bei großen Anzahlen von Individuen und großen Anzahlen von Knoten des verteilten Systems noch Beschleunigungen der Simulationszeiten zu erzielen.

Problematisch bei der dynamischen Zuordnung ist allerdings, daß Individuen ihre relative Position bzw. ihre Interaktionsmöglichkeiten zu einander in jedem Simulationsschritt verändern können. Um dies bei der gewünschten Zuordnung der Individuen zu Knoten zu berücksichtigen, muß im Prinzip nach jedem Simulationsschritt eine Neuordnung einiger Individuen erfolgen. Dies darf jedoch nicht durch eine zentrale Instanz im verteilten System erfolgen, da hierdurch ein zentraler Engpaß entstehen würde, der nach Amdahls Gesetz [1] die möglichen Beschleunigungswerte beschränkt. Verteilte Algorithmen zur Reorganisation der Individuenzuordnung zu Knoten sind jedoch noch nicht abschließend erforscht.

4 Ereignisdiskrete verteilte Simulation

Der Ansatz der ereignisdiskreten Simulation beruht darauf, das Verhalten eines zu modellierenden Systems aufgrund von asynchron eintretenden Ereignissen (etwa der Wahrnehmung eines Beute-Individuums durch ein Räuber-Individuum) zu beschreiben, die zu diskreten Zeitpunkten auftreten. Ereignisse werden durch das Eintreffen von Nachrichten bei den Prozessen bzw. Objekten ausgelöst, die die Individuen simulieren, und führen zu einem Zustandsübergang des Empfängers der Nachricht, der seinerseits das Senden weiterer Nachrichten und somit weitere Ereignisse bei anderen Individuen auslösen kann. Jedem Zustandsübergang wird eine eigene Zeitspanne der realen, simulierten Zeit zugeordnet.

Die „Taktate“ einer zeitdiskreten Modells ist nichts weiter als ein technisches Hilfsmittel zu seiner Simulation. Zunächst zeigen schon kleine Beispiele, daß der ereignisdiskrete Modellierungsansatz nicht nur allgemeiner, d. h. flexibler als der zeitdiskrete Ansatz ist, sondern in vielen Fällen auch natürlicher die Vorgänge im modellierten System darstellt. So können etwa unterschiedliche Zeitskalen für unterschiedliche Klassen von Individuen oder unterschiedliche Zeitskalen für verschiedene Zustandsformen (nahrungssuchend, schlafend) eines Individuums vorgesehen werden. Ferner kann die Interaktion zweier simulierter Individuen stets als Ereignis zu einem frei definierten Zeitpunkt stattfinden. In der individuen-orientierten Modellierung wurde der Ansatz ereignisdiskreter Modelle allerdings erstaunlicherweise bisher wenig genutzt.

Für ein ereignisdiskretes Modell ist es andererseits wesentlich schwieriger, gute Beschleunigungswerte bei einer verteilten Simulation zu erzielen, als dies im zeitdiskreten Ansatz der Fall ist. Fundamental ist zunächst das Problem der Lastverteilung. Ein häufig begangener Irrtum, der auch schon in [13] aufgedeckt wurde, besteht in der Vermutung, daß die simulierte Zeitspanne für einen Zustandsübergang eines Objekts korreliert sei mit der „Rechenzeit“, die zur Simulation dieses Übergangs erforderlich ist. Dies ist oft nicht der Fall und führt zu fehlerhaften Annahmen über eine sinnvolle und „gute“ Verteilung der Objekte auf die Knoten des verteilten Systems.

Häufig ist darüberhinaus in ereignisdiskreten Modellen eine hohe Kommunikationsrate bei relativ niedrigen Ausführungszeiten für die Berechnung einzelner Zustandsübergänge zu verzeichnen. Feingranulare Anwendungen werden von derzeitigen Multicomputern jedoch nicht sonderlich effizient implementiert, da die Bearbeitung eintreffender und zu versendender Nachrichten auf einem Knoten eines solchen Rechners relativ aufwendig ist.

Ein prinzipielles Problem verteilter ereignisdiskreter Simulation liegt jedoch im asynchronen Verhalten der Objekte bzw. Individuen begründet. In einem verteilten Simulator gibt es nur lokale Zeiten (LVT = Local Virtual Time) für die einzelnen aktiven Objekte der Simulation und lokale Warteschlangen von Ereignissen, die diese aktiven Objekte betreffen. Eine globale Zeit (GVT = Global Virtual Time), bis zu der die Simulation fortgeschritten ist, kann nur durch das Minimum dieser lokalen Uhrzeiten approximiert werden. Ereignisse, die ein aktives Objekt der Simulation betreffen, müssen jedoch in monoton steigender Folge ihres Auftretens in der realen (simulierten) Zeit behandelt werden, um das Ursache-Wirkungs-Prinzip sicherzustellen (vergleiche hierzu Leslie Lamport [10]). Die Berücksichtigung der lokalen Zeitpunkte des Erzeugens von Nachrichten in einer Simulation führt so zu Abhängigkeiten zwischen Objekten, die den möglichen Parallelismus bei der Implementierung aufgrund von Synchronisationen erheblich einschränken können.

4.1 Vermeidung von Zeitanomalien

Zeitanomalien in einer ereignisdiskreten, verteilten Simulation liegen vor, wenn Ereignisse bei einem Objekt einen Zustandsübergang ausgelöst haben, obwohl früher eingetretene Ereignisse von diesem Objekt noch nicht berücksichtigt wurden, da es von diesen Ereignissen noch nichts erfahren hat. Dies kann z. B. durch ungleichmäßige Lastverteilung im verteilten System bewirkt werden.

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel einer Zeitanomalie. Knoten A führt die Objekte PA1, PA2, etc. der verteilten Simulation aus. Knoten B führt die Objekte PB1, PB2, etc. aus. Objekt PA1, dessen lokale Simulationszeit LVT bei 183 Zeiteinheiten angekommen ist, sendet eine Nachricht an PB1, die beim Empfänger zum Zeitpunkt 195 ein Ereignis auslösen soll. Objekt PB1 ist in seiner lokalen Simulationszeit bereits bis zum Zeitpunkt 210 fortgeschritten, da es gerade eine entsprechende Nachricht von einem weiteren Objekt PC2 bearbeitet hat, die ihn von einem Knoten C vor der Nachricht von PB1 erreichte. Dies ist etwa möglich, wenn Knoten C weniger ausgelastet ist als Knoten A, der PA1 ausführt.

Das Ereignis, das durch die Bearbeitung der Nachricht von PC2 bei PB1 eingetreten ist, hätte in der simulierten Zeit jedoch erst nach dem Ereignis eintreten dürfen, das durch Eintreffen der Nachricht von PA1 ausgelöst wird.

Das prinzipielle Problem der verteilten ereignisdiskreten Simulation liegt also in der Vermeidung

Prozessor A

Prozessor B

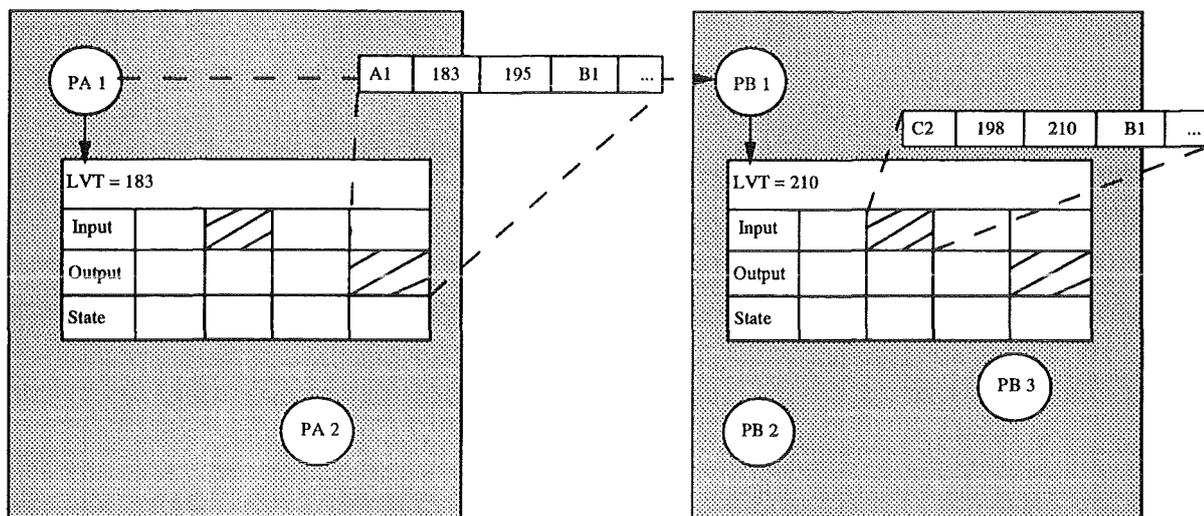


Abbildung 2: Zeitanomalie bei verteilter, ereignisdiskreter Simulation

solcher Zeitanomalien. Fundamental auf diesem Gebiet ist eine Arbeit von Chandy und Misra [2]. Misra gibt in [15] einen Überblick über weitere Arbeiten zu diesem Thema. Einen verhältnismäßig aktuellen Überblick über den Stand der Forschung geben Fujimoto [3] und Mehl [14]. Eine Einordnung des Gebiets der verteilten, ereignisdiskreten Simulation in die Landschaft verschiedener Simulationsansätze findet sich u.a. bei Mattern und Mehl [13].

Konservative Ansätze, denen insbesondere die Arbeiten von Chandy und Misra zuzurechnen sind, vermeiden a priori jedes Auftreten von Zeitanomalien, indem sie zusätzliche Maßnahmen zur Synchronisation einführen. Diese Verfahren können aber leicht zu Verklemmungen im simulierten Modell führen, wenn aktive Objekte wechselseitig auf synchronisierende Nachrichten warten. Die verschiedenen konservativen Methoden zur diskreten, verteilten Simulation unterscheiden sich im wesentlichen durch die Methoden, diese Verklemmungen zu vermeiden bzw. aufzulösen. Die Effizienz dieser Verfahren hängt unmittelbar vom Lookahead, d.h. der „Kenntnis“ der aktiven Objekte über eine Zeitspanne der simulierten Zukunft ab. Der Modellierer benötigt genaue Kenntnisse über den Synchronisationsmechanismus, um eine gute Beschleunigung der Simulation zu erzielen.

Optimistische Ansätze dagegen, denen die Arbeiten von Jefferson [8, 9] über das Time-Warp-Verfahren zugrundeliegen, führen Ereignisse für aktive Objekte sofort aus, wenn Rechenleistung dazu zur Verfügung steht. Hierbei kann es also zunächst zu Zeitanomalien kommen. In diesem Fall muß im Time-Warp-Protokoll das aktive Objekt „verfrühte“ lokale Zustandsübergänge und ausgelöste Ereignisse bzw. versendete Nachrichten zurücknehmen (Rollback) und alle seit diesem Zeitpunkt empfangenen Nachrichten erneut bearbeiten. Das offensichtliche Effizienzproblem des Time-Warp-Verfahrens liegt nicht nur in der Möglichkeit der Rollbacks sondern darüberhinaus in der Notwendigkeit regelmäßiger Sicherungskopien der lokalen Zustände aktiver Objekte sowie einer Speicherung aller erzeugten und empfangenen Nachrichten eines aktiven Objekts. Diese wird in Abbildung 2 bereits durch Input-, Output- und State-Queues an den Prozessen bzw. aktiven Objekten angedeutet. Nur auf der Grundlagen dieser Daten ist die Durchführung eines Rollback überhaupt möglich.

Trotz des unverkennbaren Overheads ist dieses Verfahren dem konservativen Verfahren vielfach in der Effizienz der Simulation überlegen. Während im konservativen Verfahren Prozessoren häufig „idle“ bleiben, da ihre Knoten auf Synchronisationsnachrichten warten, wird in einem optimistischen Verfahren diese Wartezeit zu spekulativen Berechnungen genutzt, die im günstigen Fall nicht wieder zurückgenommen werden müssen. Im OFFIS-Projekt DNS (Distributed Net Simulation) wird ein solcher optimistischer verteilter Simulator für THOR-Netz-Modelle entwickelt [16].

5 Zusammenfassung

Individuen-orientierte Modelle sind durchaus geeignet für eine verteilte Simulation. Eine verteilte Simulation ist insbesondere dann erforderlich, wenn Ergebnisse der Simulation zu einer Visualisierung in Realzeit verfügbar sein müssen. Eine Realzeitanimation erlaubt nicht nur eine interaktive Evaluation des Modells sondern auch eine anschauliche und wirkungsvolle Darstellung des Modells für fachfremde Entscheidungsträger.

Die Gegenüberstellung des zeitdiskreten mit dem ereignisdiskreten verteilten Ansatz zeigt, daß die zeitdiskrete Modellbildung relativ unflexibel durch ein starres Zeitraster für alle Individuen ist. Ferner ergibt sich ein hoher Overhead für invariante Modellteile, da zu jedem Zeitpunkt die lokalen Zustände aller Individuen neu berechnet werden müssen. Zeitdiskrete Modelle sind jedoch einfacher verteilt zu implementieren als ereignisdiskrete Modelle und versprechen insbesondere gute Beschleunigungsfaktoren durch den Einsatz weiterer Knoten, wenn die Individuenzahlen genügend groß sind.

Der ereignisdiskrete Ansatz zeigt sich dagegen als wesentlich flexibler bei der Modellbildung. Jedes Individuum kann seinen eigenen Zeit„takt“ in der Simulation haben und sofort auf Veränderungen in seiner Umgebung reagieren. Invariante Modellteile erzeugen keinen Overhead. Dagegen ist die verteilte Implementierung aufwendiger und insbesondere die Lastverteilung im verteilten System wird wesentlich schwieriger, sodaß die bisher erreichten Beschleunigungswerte beim Einsatz von großen Knotenzahlen des verteilten Systems nicht immer befriedigend sind.

Literatur

- [1] G. Amdahl: Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities. In *AIFS Conference Proceedings*, pp. 483-485, Thompson Books, Washington DC, April 1967
- [2] K.M. Chandy, J. Misra: Distributed Simulation: A Case Study in Design and Verification of Distributed Programs. In *IEEE Transactions on Software Engineering* SE-5, No. 5, pp. 440-452, 1979
- [3] R.M. Fujimoto: Parallel Discrete Event Simulation. In *Communications of the ACM*, Vol. 33, No. 10, pp. 31-53, 1990
- [4] A. Geist et al: *PVM 3 user's guide and reference manual*. Oak Ridge National Laboratory, Report ORNL/TM-12187, Oak Ridge (Tennessee), 1993
- [5] P. Hogeweg, B. Hesper: Individual Oriented Modeling in Ecology. In *Math. Comp. Modeling*, Vol. 6, No. 3, pp. 83-90, 1990

- [6] M.A. Huston, D.L. DeAngelis, W. Post: New computer models unify ecological theory. Computer simulation show that many ecological patterns can be explained by interacting among individual organisms. In *Bioscience*, Vol. 38, pp. 682-691, 1988
- [7] A. Huth, C. Wissel: The Simulation of the Movement of Fish Schools. In *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 156, pp. 365-385, 1992
- [8] D.R. Jefferson: Virtual Time. In *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 404-425, 1985
- [9] D.R. Jefferson: Virtual Time II: Storage Management in Distributed Simulation. In *ACM Conference on Principles of Distributed Computation*, 1990 (revised internal version 1991)
- [10] L. Lamport: Time, Clocks, and the Ordering of Events in a Distributed System. In *Communications of the ACM*, Vol. 21, No. 7, pp. 558-565, 1978
- [11] H. Lorek, K. Rössig, M. Sonnenschein: Verteilte Simulation individuenbasierter Modelle. In *Proceedings 8. Symposium „Informatik für den Umweltschutz“*, Hamburg, S. 319-326, Metropolis-Verlag, 1994
- [12] H. Lorek: Ein Performance-Modell zur verteilten Analyse verteilter Partikelsimulationen. In *Mitteilungen - Gesellschaft für Informatik e.V., Parallel-Algorithmen und Rechnerstrukturen* Nr. 13, S. 75-84, 1984
- [13] F. Mattern, H. Mehl: Diskrete Simulation - Prinzipien und Probleme der Effizienzsteigerung durch Parallelisierung. In *Informatik Spektrum* 12, S. 198-210, 1989
- [14] H. Mehl: *Methoden verteilter Simulation*, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiebaden, 1994
- [15] J. Misra: Distributed Discrete Event Simulation. In *ACM Computing Surveys*, Vol. 18, No. 1, pp. 39-65, 1986
- [16] St. Schöf, M. Sonnenschein, R. Wieting: Sequentielle und verteilte Simulation von THOR-Netzen. In J. Desel, A. Oberweis, W. Reisig (Hrsg.): *Workshop Algorithmen und Werkzeuge für Petrinetze* der GI-Fachgruppe 0.0.1, Berlin, S. 61-66, Universität Karlsruhe, AIFB-Bericht 309, Oktober 1994
- [17] M. Sonnenschein, A. Gronewold: Diskrete Petrinetze für individuenbasierte Modelle. In A. Frischmuth, A. Gnauck (Hrsg.): *Ökosysteme – Modellierung und Simulation*, Eberhard Blottner Verlag, Reihe „Umweltwissenschaften“, (erscheint Anfang 1995)

Grundlagen individuenorientierter Modellierung und ihre Anwendung im Umweltbereich

Jörg Ortmann

Fachbereich Informatik, Universität Rostock
Albert-Einstein-Straße 21, 18051 Rostock
e-mail: jortmann@informatik.uni-rostock.de

2.März 1995

1 Motivationen für den Einsatz individuenorientierter Modelle

Individuenorientierte Modellieransätze bilden eine wesentliche Grundlage zur Simulation von Systemen, wenn diese spezielle Eigenschaften besitzen, die untersucht bzw. modelliert werden sollen. Herkömmliche Modellierungsansätze gehen von einer Abstraktion von den Objekten eines realen Systems aus. Es werden mehrere Objekte gleichen Typs des Originalsystems zu einem einzigen Objekt des Modells zusammengefaßt, das eine aggregierte Größe des Systems, wie z.B. die Biomasse von Organismen oder die Anzahl von Fahrzeugen, beschreibt. Die Dynamik des Modells ergibt sich dann aus den Zusammenhängen, die zwischen den aggregierten Größen bestehen. Da bei diesen Modellen einzelne Objekte des realen Systems zu sogenannten Kompartments zusammengefaßt werden, spricht man auch von kompartmentorientierten Modellen. Individuenorientierte Modelle dagegen bilden jedes Objekt des Originals in ein Objekt des Modells ab. Bei diesen einzelnen Objekten spricht man auch von Individuen. Aus der Dynamik der einzelnen Individuen und der Interaktion zwischen ihnen ergibt sich schließlich die Dynamik des Modells.

Betrachtet man Systeme näher, kann man feststellen, daß viele Systeme sehr stark strukturiert sind. Bei einigen Systemen sind diese Strukturen sehr auffällig bei anderen weniger. Einem Räuber-Beute-System, einem Vogelschwarm, einem Sonnensystem oder einem Verkehrsfluß sieht man diese Strukturierung sehr deutlich an, bestehen sie doch aus wohl unterscheidbaren Individuen, die in Abhängigkeit von anderen im System befindlichen Individuen ein bestimmtes Verhalten zeigen. Andere Systeme, wie z.B. Flüssigkeiten oder Gase, werden oft als ein homogenes Medium angesehen, deren Dynamik man mittels Differentialgleichungen beschreiben kann. Genaugenommen bestehen aber auch diese Systeme aus einzelnen Objekten, deren Verhalten voneinander abhängig ist. Der Unterschied zu obigen Systemen besteht einzig darin, daß das System nicht nur aus relativ wenigen, sondern aus Millionen von Individuen besteht. Dem Zu-

sammenwirken der einzelnen Objekte verdankt das betrachtete System seine Dynamik und auch wenn das Gesamtsystem sehr komplex erscheint, kann man doch feststellen, daß sich das Verhalten und die Interaktionen der Individuen durch einfache Regeln relativ genau nachbilden lassen.

Der Einsatz individuenorientierter Konzepte zur Modellierung und Simulation von Systemen kann aus verschiedenen Gründen erfolgen:

1. um eine andere Beschreibungsform für die Modellierung eines Systems zu nutzen,
2. um die Modellierung und Simulation eines Systems zu ermöglichen,
3. um in Experimenten spezielle Aussagen über ein reales System zu gewinnen.

Bei 1. geht es vor allem darum, Modellierern, die Schwierigkeiten beim Umgang mit herkömmlichen Beschreibungsmitteln — wie z.B. Systeme partieller Differentialgleichungen — haben, alternative Modellierungsmöglichkeiten zur Verfügung zu stellen. Das Formulieren von Verhaltensregeln eines Individuums in Abhängigkeit von anderen Individuen ist für bestimmte Nutzerkreise oft leichter als die Formalisierung des Systems durch Aufstellen eines Systems partieller Differentialgleichungen. Bei größeren Systemen wird jedoch die Beschreibung der Verhaltensregeln sehr umfangreich und somit fehlerträchtig. Da unter dem Aspekt einer alternativen Beschreibungsform individuenorientierte Modellbeschreibungen qualitativ nicht mehr leisten können als kompartmentorientierte Ansätze, sollten Nutzer möglichst kompartmentorientierte Modellbeschreibungen favorisieren.

Es gibt jedoch Systeme, die sich nur durch Anwendung individuenorientierter Ansätze effektiv modellieren und simulieren lassen. Zu solchen Systemen gehören Vielkörpersysteme, wie z.B. Sonnensysteme, die aus Planeten und ihren Monden bestehen, die sich bewegen und gegenseitig beeinflussen. Die Struktur dieses Systems ist so ausgelegt, daß die Objekte des Systems nicht zu Kompartments zusammengefaßt werden können, die dann beschrieben werden können. Dementsprechend muß das Verhalten jedes einzelnen Objekts des Systems modelliert werden.

Ein weiteres und wohl wichtigstes Einsatzgebiet individuenorientierter Modellier- und Simulationsansätze ist dadurch charakterisiert, daß in Experimenten spezielle Eigenschaften eines realen Systems zu untersuchen sind, die durch kompartmentorientierte Ansätze nicht modelliert werden können. In diesen Fällen kann auf individuenorientierte Modelle zurückgegriffen werden, die die Modellierung dieser Eigenschaften ermöglichen. Solche Eigenschaften zeichnen sich vor allem dadurch aus, daß sie einzelnen Objekten eines Systems zugeordnet sind oder sich aus Interaktionen spezieller Objekte ergeben. Beispiele dafür sind die Reisezeit, der Kraftstoffverbrauch und der Ausstoß von Abgasen bei Fahrzeugen, die Nischenbildung und die bevorzugte Wegewahl von Organismen oder spezielle Handlungsstrategien von Individuen. Die Herausarbeitung von Systemklassen, Klassen von Eigenschaften und Untersuchungszielen, für deren Modellierung bzw. Untersuchung sich individuenorientierte Ansätze als günstig erweisen, ist notwendig, um einen sinnvollen Einsatz individuenorientierter Modellierung und Simulation zu ermöglichen.

2 Individuenorientierte Modellierung

Um eine effektive individuenorientierte Modellentwicklung zu gewährleisten, sind Hilfsmittel bereitzustellen, die den Modellierer bei der Modellierung und Simulation von Systemen unterstützen. Besonders wichtig ist dabei eine Modellbeschreibungssprache, die alle Beschreibungsmittel zur individuenorientierten Modellierung von Systemen beinhaltet und die Interna des zugrundeliegenden Simulationslaufzeitsystems verdeckt. Sicher ist es auch möglich, für eine spezielle Anwendung ein individuenorientiertes Modell in einer höheren Programmiersprache zu entwickeln, ohne auf eine spezielle Modellbeschreibungssprache zurückzugreifen. Dabei sollte aber immer beachtet werden, daß das komplette Simulationslaufzeitsystem neu zu implementieren ist und die so erstellten Modelle einen geringen Wiederverwendungswert besitzen. Der Aufwand, der dabei betrieben werden muß, ist im allgemeinen so groß, daß die Akzeptanz für den Einsatz individuenorientierter Modellierungsansätze fehlt.

Zur Zeit existieren nur für einige Spezialfälle individuenorientierter Modelle — wie z.B. Zellularautomaten oder Lattice-Gas-Modelle — Simulationsumgebungen, die Modellbeschreibungssprachen, effiziente Simulationslaufzeitsysteme und teilweise auch spezielle Hardwareunterstützungen beinhalten. Mit diesen Systemen wird aber nur ein geringer Teil der Einsatzgebiete individuenorientierter Modelle abgedeckt. Aufgabe der Informatik sollte es deshalb sein, Simulationssysteme bereitzustellen, die den Modellierer im gesamten Prozeß der Modellentwicklung und -nutzung unterstützen, die Wiederverwendbarkeit der Modelle garantieren und eine effiziente Simulation auch sehr komplexer Systeme ermöglichen.

Im folgenden sollen die Grundlagen individuenorientierter Modellierungskonzepte kurz vorgestellt werden. Zunächst soll jedoch geklärt werden, wodurch individuenorientierte Modelle gekennzeichnet sind und für welche Systemeigenschaften Beschreibungsmittel bereitgestellt werden müssen.

2.1 Systemcharakteristik unter individuenorientierter Betrachtungsweise

Betrachtet man ein System individuenorientiert, muß man zwischen den Individuen und dem Beobachtungsraum, in dem sich diese Individuen aufhalten, unterscheiden. Dabei sind neben der Beschreibung dieser Komponenten auch die Interaktionen zwischen diesen zu berücksichtigen.

Beobachtungsraum

Ein Beobachtungsraum ist im allgemeinen durch ein bestimmtes Gebiet charakterisiert, das aus Teilgebieten bestehen kann. Er weist spezielle Eigenschaften, wie z.B. durchschnittliche Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Gefälle, auf, die in den einzelnen Teilgebieten unterschiedliche Ausprägungen besitzen und unter Umständen zeitabhängig sein können. Desweiteren ist ein Beobachtungsraum natürlich durch die in ihm befindlichen Individuen charakterisiert.

Zusammengefaßt ist ein Beobachtungsraum durch folgende Daten bestimmt:

- Teilgebiete des Beobachtungsraumes
- räumliche Ausdehnung des gesamten Beobachtungsraumes und seiner Teilgebiete
- Eigenschaften in den einzelnen Teilgebieten des Beobachtungsraumes
- Individuen, die sich im Beobachtungsraum aufhalten

Individuen

Individuen werden durch bedeutend mehr Kenngrößen charakterisiert. Sie sind in einen Beobachtungsraum eingebettet, in dem sie sich nach gewissen Regeln frei bewegen können. Als Vertreter einer bestimmten Individuenklasse sind sie identifizierbar und besitzen eine bestimmte Größe. Der Zustand eines Individuums ist durch anwendungsspezifische Größen gekennzeichnet. Zustände, die jedes Individuum besitzt, sind die Position innerhalb eines Beobachtungsraumes und die Blickrichtung des Individuums. Weitere Zustandsgrößen können z.B. die Geschwindigkeit oder Beschleunigung sein. Eine Nachbarschaft definiert ein Gebiet um ein Individuum, in dem es in der Lage ist, mit anderen Individuen interagieren zu können. Individuen außerhalb dieser Nachbarschaft können vom Individuum nicht wahrgenommen werden, womit keine Kommunikation mit diesen möglich ist. Schließlich ist ein Individuum durch sein Verhalten charakterisiert, das seine Zustandsänderung in Abhängigkeit von seinem eigenen Zustand und dem seiner Nachbarindividuen beschreibt und dem verschiedene Handlungsstrategien zugrundeliegen können. Sehr komplexe Individuen können aus Teilsystemen bestehen, die untereinander in Beziehung stehen und das Verhalten des Individuums bestimmen.

Ein Individuum kann somit durch folgende Informationen charakterisiert werden:

- Beobachtungsraum, in den es eingebettet ist
- Typ (Art) des Individuums
- Größe des Individuums
- Zustandsgrößen
- Nachbarschaft
- Verhaltensbeschreibung
- Struktur des Individuums
 - Teilsysteme, aus denen das Individuum besteht
 - Beziehungen zwischen den Teilsystemen

Interaktionen

Die Interaktionen, die innerhalb eines individuenorientierten Modells auftreten können, lassen sich in zwei Klassen einteilen:

1. Interaktionen zwischen einzelnen Individuen
2. Interaktionen zwischen Individuen und Beobachtungsraum

Zwischen einzelnen Individuen ist eine Kommunikation notwendig, um Informationen über ein Individuum abzufragen. Interessante Größen sind z.B. Zustandsvariablen oder spezielle Parameter, durch die verschiedene Individuen bestimmt sind. Weiterhin sind Interaktionen erforderlich, um bestimmte Aktionen, wie z.B. das Sterben oder Reproduzieren eines Individuums anzustoßen.

Interaktionen zwischen Individuen und dem Beobachtungsraum, in dem sie sich befinden, dienen hauptsächlich dazu, Eigenschaften des Beobachtungsraumes in einem bestimmten Teilgebiet zu einem festgelegten Zeitpunkt zu erfragen und die Nachbarschaft eines Individuums zu erkunden, d.h. festzustellen, mit welchen anderen Individuen Kommunikationen aufgenommen werden können.

2.2 Grundlagen individuenorientierter Modellierungskonzepte

Ein individuenorientiertes Modellierungskonzept sollte sehr allgemein gehalten sein und sich nicht an der Modellierung eines speziell strukturierten Systems orientieren, so daß eine große Klasse von Systemen unter Nutzung dieses Konzepts beschreibbar ist. Da der individuenorientierte Modellieransatz von der Beschreibung selbständiger Objekte eines Systems und deren Kommunikation miteinander ausgeht, bietet es sich an, das Modellierungskonzept auf dem objektorientierten Paradigma, dem ein ausgeprägtes Potential zur Formulierung paralleler Abläufe innewohnt, aufzubauen. Um verschiedene Handlungsstrategien modellieren zu können, hat sich ein prozeßorientierter Ansatz zur Verhaltensbeschreibung als günstig erwiesen. Es müssen Klassen zur Verfügung gestellt werden, die den Modellierer bei der individuenorientierten Modellierung eines Systems unterstützen. In ihnen müssen grundlegende Kenngrößen eines individuenorientierten Modells und Schablonen zur Modellierung anwendungsspezifischer Merkmale eines Systems bereitgestellt werden. Implementationsabhängige Aspekte sollten beim Entwurf der Klassen nicht berücksichtigt werden, so daß das Konzept als Grundlage verschiedener Implementationen — sei es der Entwurf einer konkreten Modellbeschreibungssprache oder eine Umsetzung in einer höheren Programmiersprache — dienen kann.

Um eine spätere Transformation der Modellbeschreibung in ein Rechenmodell zu erleichtern, ist es günstig, wenn sowohl das Modellierungskonzept als auch das Simulationssystem auf gleichen systemtheoretisch fundierten Systemdefinitionen — wie z.B. in [Zei76] vorgestellt — beruhen. Ansätze dazu wurden u.a. in [Öre84], [Nek94] und [Ort94] behandelt. Für die vielfältigen Strukturen eines individuenorientierten Modells sind somit verschiedene Systemdefinitionen bereitzustellen, die als Grundlage für ein zu entwerfendes Modellierungskonzept dienen.

Nach der Komplexität eines Individuums kann man sie grundsätzlich in elementare und strukturierte Individuen unterscheiden. Elementare Individuen können durch atomare Systeme repräsentiert werden, d.h. sie sind nicht weiter zerlegbar und beinhalten die vollständige Dynamikbeschreibung des Individuums. Je nachdem wodurch die Dynamik elementarer Individuen charakterisiert ist, kann man sie durch verschiedene atomare Systeme darstellen. Weist ein Individuum nur Zustandsänderungen zu diskreten Zeitpunkten auf, kann es als ein diskret-ereignisorientiertes System aufgefaßt werden. Ist das Verhalten durch kontinuierliche Zustandsänderungen geprägt, empfiehlt sich dagegen die Betrachtung des Individuums als kontinuierliches System. Treten sowohl kontinuierliche Zustandsänderungen als auch solche zu diskreten Zeitpunkten auf, kann es als ein kombiniert diskret-kontinuierliche Systeme angesehen werden. In Abhängigkeit davon, welche Art von Zustandsänderungen dominanter ist, können dabei unterschiedlichste Systeme zu Grunde gelegt werden. In [Prä92] wurden verschiedene Ansätze zur Beschreibung kombiniert diskret-kontinuierlicher Systeme behandelt.

Strukturierte Individuen lassen sich durch gekoppelte Systeme darstellen, die selbst keine Dynamikbeschreibung beinhalten. Die Dynamik des Systems ist hier einzig durch die Dynamik und die Kopplung der Teilsysteme gegeben. Bei sehr komplexen Individuen ist oft eine Berücksichtigung von Strukturvariabilitäten erforderlich. Abbildung 1 zeigt die unterschiedlichen Ausprägungen von Individuen und verdeutlicht so, für welche Systeme Systemdefinitionen bereitzustellen sind, um die Modellierung von Individuen zu unterstützen.

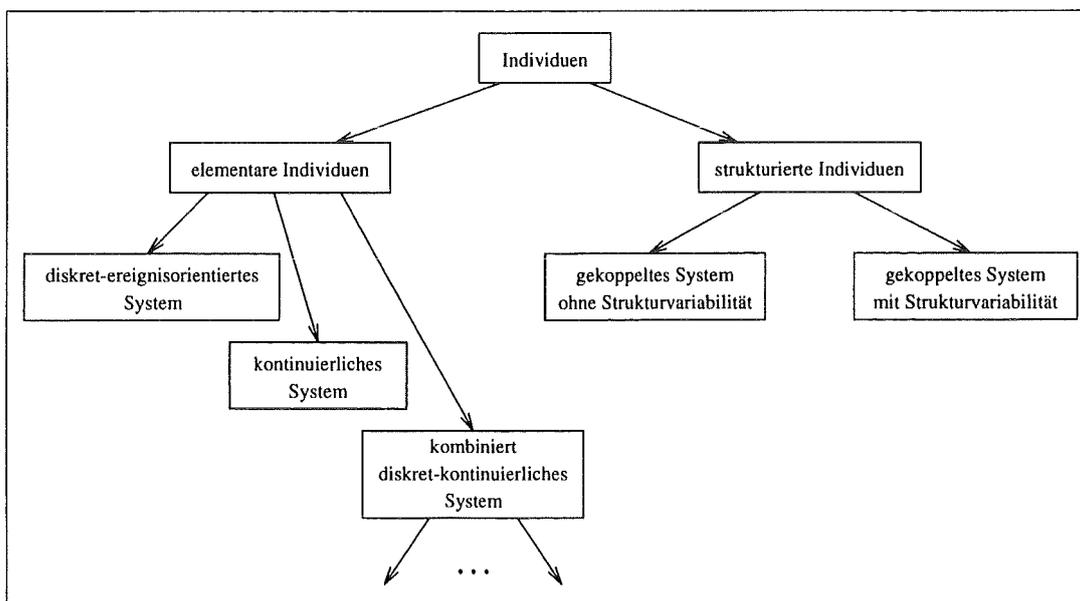


Abbildung 1: Ausprägungen von Individuen

Beobachtungsräume lassen sich grundsätzlich als ein gekoppeltes System von Teilsystemen ansehen. Die Teilsysteme, die die Dynamik des Beobachtungsraumes beschreiben, stellen die Individuen des Beobachtungsraumes dar. Die Kommunikationen der Individuen untereinander werden dabei durch die Kopplungen der Teilsysteme repräsentiert. Ein ausgezeichnetes Teilsystem ist für die Beschreibung der Eigenschaften des Beobach-

tungsraumes, die zum Teil raum- und zeitabhängig sein können, zuständig. Je nachdem, in welchem Maße sich die Individuen innerhalb des Beobachtungsraumes bewegen, und sich somit die Kommunikationsverbindungen zwischen den Individuen ändern, kann der Beobachtungsraum als ein gekoppeltes System ohne Strukturvariabilität, mit schwacher oder starker Strukturvariabilität betrachtet werden. In den meisten Fällen ist jedoch mit starker Strukturvariabilität zu rechnen.

Basierend auf einem systemtheoretischen Gerüst und unter Verwendung objekt- und prozeßorientierter Paradigmen, lassen sich individuenorientierte Modellierungskonzepte entwickeln, die die Wiederverwendbarkeit und Validierung von Modellen, die leichte und korrekte Umsetzung der Modelle in Rechenmodelle und die Verifikation der Rechenmodelle gewährleisten. Ein solches individuenorientiertes Modellierungs- und dazugehöriges Simulatorkonzept sowie die prototypische Implementation der Konzepte in C++ ist in [Ort94] beschrieben.

3 Individuenorientierte Modelle des Verkehrsflusses und ihre Anwendung im Umweltbereich

An dieser Stelle soll eine Anwendung individuenorientierter Modellierung und Simulation im Umweltbereich vorgestellt werden.

Für die Berechnung von Schadstoffausbreitungen existieren viele Modelle. Sie werden z.B. bei Genehmigungsverfahren für Kraftwerke eingesetzt, um zu prüfen, ob sich die Umweltbelastung, die durch das Kraftwerk erzeugt wird, im gesetzlichen Rahmen hält. Bei den meisten dieser Modelle wird davon ausgegangen, daß die Schadstoffquelle nur aus einer oder wenigen Punktquellen besteht. Will man bei Schadstoffausbreitungsrechnungen den Straßenverkehr als Schadstoffquelle betrachten, sind die Schadstoffproduzenten die einzelnen Fahrzeuge, die am Straßenverkehr teilnehmen. Um nun Schadstoffberechnungen durchzuführen bieten sich drei Ansätze an:

1. Die gesamte Straße wird als Schadstoffquelle betrachtet und es wird angenommen, daß an jedem Punkt der Straße der Ausstoß von Schadstoffen gleich ist.
2. Es werden jeweils einzelne Teilstrecken der Straße als Schadstoffquellen betrachtet, für die angenommen werden kann, daß der Schadstoffausstoß in jedem Punkt der Teilstrecke gleich ist.
3. Die einzelnen Fahrzeuge, die sich auf der Straße befinden, werden als Schadstoffquellen angesehen.

Bei den ersten beiden Ansätzen können die Zeitreihen der Schadstoffemission ermittelt werden, indem u.a. die Auslastung und die durchschnittliche Geschwindigkeit auf der Straße bzw. einzelnen Straßenabschnitten ermittelt werden und daraus der durchschnittliche Schadstoffausstoß geschätzt wird. Untersuchungen, die z.B. der Ermittlung des Einflusses des Fahrverhaltens einzelner Fahrzeuge auf die Schadstoffbelastung der Umgebung dienen sollen, sind hiermit nicht durchführbar. Wird der Straßenverkehr aber individuenorientiert modelliert, kann für jedes einzelne Fahrzeug in Abhängigkeit

von seinem Fahrverhalten der Kraftstoffverbrauch und der Schadstoffausstoß ermittelt werden, wodurch solche oder ähnliche Untersuchungen ermöglicht werden.

Den prinzipiellen Aufbau eines Simulationsmodells, das der Untersuchung von Schadstoffausbreitungen emittierter Abgase von Fahrzeugen dienen soll, zeigt Abbildung 2. Das individuenorientierte Modell des Straßenverkehrs, ist für die Berechnung der Schad-

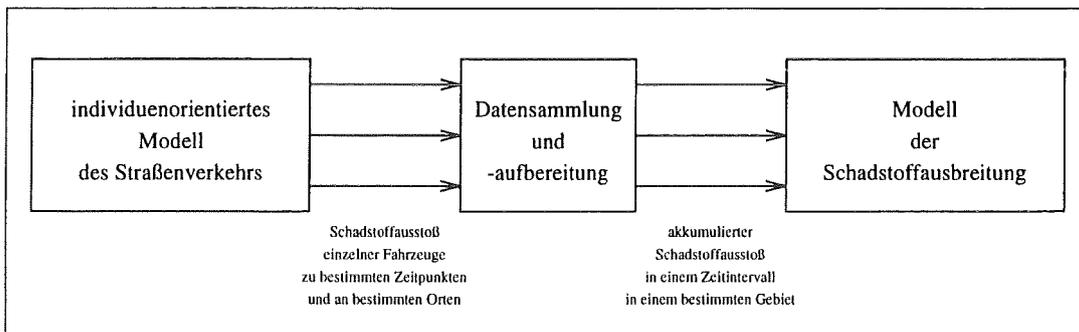


Abbildung 2: Grundprinzip eines Simulationsmodell zur Untersuchung der Schadstoffausbreitung emittierter Abgase

stoffausstöße verantwortlich. In einer speziellen Komponente werden die durch das Verkehrsmodell gelieferten Daten gesammelt und so aufbereitet, daß sie als Eingabe für ein Schadstoffausbreitungsmodell dienen können. Durch entsprechende Parametrisierung des individuenorientierten Modells können auf diese Weise die Auswirkungen des Straßenverkehrs auf die Umgebung untersucht werden.

In [Ort94] wurde ein sehr einfaches individuenorientiertes Modell des Verkehrsflusses auf Autobahnen entwickelt. Es basiert auf der Arbeit [Wie74] und dient hauptsächlich der Untersuchung des Fahrverhaltens von Fahrzeugen. Im folgenden soll die Grundidee des Modells kurz vorgestellt werden.

Individuenorientierte Modelle beschreiben den Verkehrsfluß durch die Nachbildung einzelner Fahrer-Fahrzeug-Elemente und deren Zusammenwirken. Das Fahrverhalten eines Fahrzeuges ergibt sich dabei aus dem Abstand und der Geschwindigkeitsdifferenz zum vorausfahrenden Fahrzeug und fahrerspezifischen Eigenschaften, die das Wunschverhalten und Wahrnehmungsschwellen beschreiben. Durch Änderungen der fahrerspezifischen Eigenschaften lassen sich verschiedene Verhaltensweisen erzeugen, die dann untersucht werden können.

Das Fahrverhalten eines Fahrer-Fahrzeug-Elements kann in verschiedene Verhaltensbereiche eingeteilt werden, die durch fahrerspezifische Wahrnehmungsschwellen voneinander abgegrenzt sind (vgl. Abbildung 3):

- Abwenden einer Gefahrensituation – *BREMSAX*

Bei Unterschreitung eines minimalen Sicherheitsabstandes *BX* infolge einer plötzlichen Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeuges kann ein Auffahren nur durch heftiges Bremsen verhindert werden.

- Annäherung an den Vordermann – *BREMSBX*

Wird eine Annäherung an das vorausfahrende Fahrzeug erkannt, erfolgt eine Reduzierung der Geschwindigkeit, die im allgemeinen durch Betätigung des Gaspedals erzielt werden kann.

- Fahren im Folgebereich – *FOLGEN*

Sind die Geschwindigkeitsdifferenzen zum vorausfahrenden Fahrzeug so gering, daß sie nicht wahrgenommen werden können, wird versucht, den gewünschten Folgeabstand zu halten.

- unbeeinflusstes Fahren – *WUNSCH*

Ist der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug so groß, daß das Fahrzeug unbeeinflusst fahren kann, wird versucht, mit der Wunschgeschwindigkeit zu fahren bzw. diese zu erreichen.

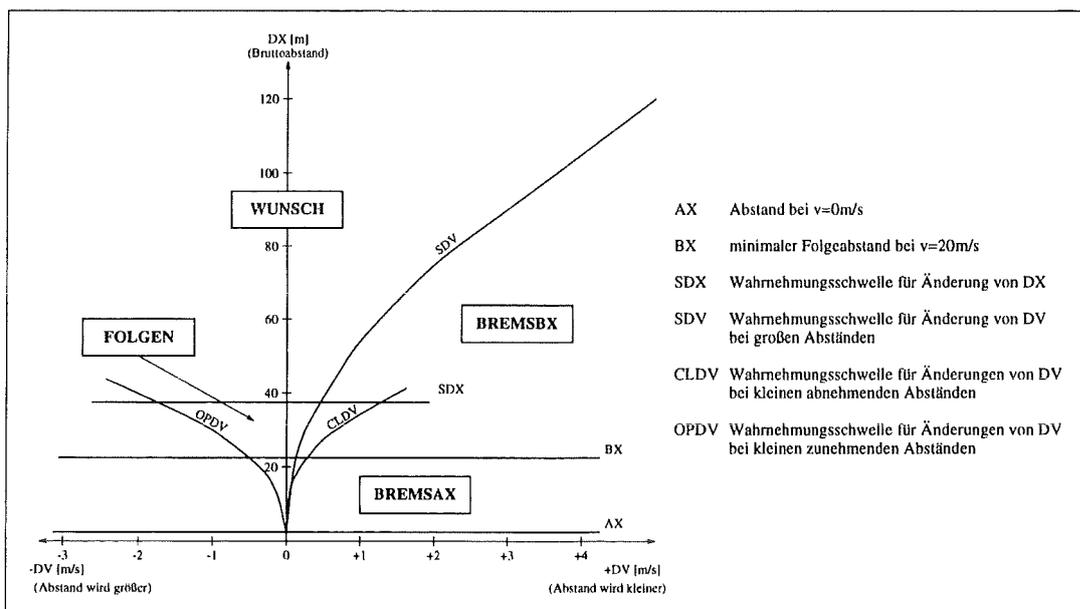


Abbildung 3: Abgrenzung der Verhaltensbereiche durch Wahrnehmungsschwellen

In Abhängigkeit von den Wahrnehmungsschwellen, einem maximal wahrnehmbaren Abstand, der Relativgeschwindigkeit DV und dem Abstand DX zum vorausfahrenden Fahrzeug, kann der Verhaltensbereich ermittelt werden, der das kinematische Verhalten — Geschwindigkeit und Beschleunigung — des Fahrzeuges bestimmt.

Will man das Modell für die Bereitstellung von Eingangsdaten für ein Schadstoffausbreitungsmodell nutzen, ist eine Erweiterung des oben skizzierten Modells erforderlich. Diese beinhaltet, daß aus der Geschwindigkeit und der Beschleunigung eines Fahrzeuges Informationen über den Kraftstoffverbrauch und Schadstoffausstoß einzelner Fahrzeuge gewonnen werden müssen.

Durch Verfeinerung und Erweiterung der Fahrzeugmodelle lassen sich auch sehr komplexe Verkehrssituationen nachbilden, wodurch sich eine Vielzahl möglicher Untersuchungsziele ergibt.

Literatur

- [Nek94] Timo Nekien. *Zellulare Automaten — Entwurf, Implementation und Anwendung eines Simulators für räumlich zweidimensionale Anwendungen*. Diplomarbeit, Universität Rostock, 1994.
- [Öre84] T. I. Ören. *GEST — A Modelling and Simulation Language Based on System Theoretic Concepts*. In T.I. Ören, B.P. Zeigler, and M.S. Elzas, editors, *Simulation and Model-Based Methodologies: An Integrative View*. North-Holland, Amsterdam, 1984.
- [Ort94] Jörg Ortmann. *Individuenorientierte Modellier- und Simulationsansätze als Grundlagen zur Untersuchung ausgewählter Verhaltensweisen auf Autobahnen*. Diplomarbeit, Universität Rostock, 1994.
- [Prä92] H. Prähofer. *System Theoretic Foundations for Combined Discrete-Continuous System Simulation*. Dissertation, Universität Linz, 1992.
- [Wie74] R. Wiedemann. *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, 1974.
- [Zeig76] B.P. Zeigler. *Theory of Modelling and Simulation*. John Wiley, New York, 1976.

Dynamische Simulation der biologischen Abwasserreinigung

J. Alex
R. Tschepetzki

ifak
Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg
an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Steinfeldstraße (IGZ)
D-39179 Barleben
Tel.: 039203 / 810 44
Fax: 039203 / 811 00

14. Februar 1995

1 Zielsetzung

Steigenden Anforderungen an die Reinigungsleistung führen zu immer komplexer werdenden Kläranlagen. Die gewissenhafte Planung der Anlage, des Steuerungs- und Regelungssystems und flexibler Betriebsstrategien hat entscheidenden Einfluß auf Bau- und Betriebskosten.

Die Modellierung und dynamische Simulation von Belebungsanlagen ist inzwischen ein zuverlässiges Mittel zur Vorhersage des Anlagenverhaltens, zur Untersuchung der komplexen nichtlinearen Zusammenhänge des Abwasserreinigungsprozesses und zur Unterstützung der Betriebsführung geworden [OTT-90], [PAT-89], [LAD-91], [HOE-94], [OTT-94].

Die dynamische Simulation von Kläranlagen hat im wesentlichen folgende Anwendungsspekte:

- Senkung von Investitionskosten durch genaue Planung
Durch simulatives Vergleichen von Anlagen-Konfigurationen unter den jeweils gegebenen Zulaufbedingungen kann eine maßgeschneiderte Anlage geplant werden. Mit dem Simulationsmodell können bereits im Planungsstadium Erfahrungen mit der künftigen Anlage gesammelt werden.
- Senkung von Betriebskosten durch intelligente Automatisierung
Mit Hilfe der dynamischen Simulation können Steuerungen und Regelungen entworfen werden, die bei minimalen Betriebskosten eine hohe Prozeßstabilität sichern. Dies kann im Gegensatz zu Versuchen an einer realen Anlage ohne Gefährdung der Umwelt, mit zu Vergleichszwecken reproduzierbaren Zulaufsituationen, mit einem vertieften Einblick in die internen Vorgänge (Biologie) und im gerafften Zeitmaßstab erfolgen.
- Nutzung des gesamte Reinigungspotential durch flexible Betriebsstrategien
Der Umgang mit dynamischen Modellen vergrößert das Verständnis für die Prozesse in der Anlage. Konzepte zur bestmöglichen Betriebsführung bei unterschiedlichen

Situationen können erprobt und verbessert werden. So sind typischerweise bei Schwachlast bzw. im Sommerbetrieb Reserven vorhanden, die bei geeigneter Betriebsführung ausgenutzt werden können.

2 Modellgrundlagen

Die meisten Modelle zur Simulation von Belebungsanlagen basieren auf dem von der IAWPRC (International Association on Water Pollution Research and Control) erarbeiteten Modell „Activated Sludge No. 1“ [HEN-87]. Dieses Modell bietet mit angemessener Detailliertheit eine allgemein akzeptierte Grundlage für verfahrenstechnische und regelungstechnische Untersuchungen zum CSB- und Stickstoffabbau.

Modelle, die darüber hinaus die Phosphorelimination beschreiben, sind ebenfalls verfügbar. Ein wichtiger Vertreter dieser Gruppe ist das „Activated Sludge Model No. 2“ [HEN-94], [GUJ-94] der zwischenzeitlich von IAWPRC in IAWQ umbenannten International Association on Water Quality. Im Gegensatz zum etablierten Ansatz „Activated Sludge Model No. 1“ erfordert das 1994 publizierte Modell No. 2 erst noch den Aufbau eines entsprechenden Erfahrungsschatzes.

Eine der kompliziertesten Modellkomponenten ist die Nachklärung. Auch hier gibt es unterschiedlich detaillierte Ansätze, von idealen Feststoffabscheidern angefangen, über Modelle mit Unterscheidung von Trenn- und Eindickzone [KÖH-88], Modelle mit Einteilung in mehrere horizontale Schichten [SCH-88], [HÄR-90], bis zu Modellen mit mehrdimensional verteilten Parametern.

Zur Simulation des gesamten Abwasserreinigungsprozesses sowie des Ablaufes einer Kläranlage muß ein detailliertes Nachklärermodell zusammen mit dem Modell für die Belebungsbecken und ggf. einem Vorklärungsmodell verwendet werden. Für den Belebtschlammteil, der den Kern der Modellierung der biologischen Kläranlage bildet, wird von den Autoren der Modellansatzes „Activated Sludge No. 1“ verwendet.

Das Modell „Activated Sludge No. 1“ unterscheidet zwei unterschiedliche Gruppen von Mikroorganismen - die autotrophe und die heterotrophe Biomasse - und bilanziert weitere elf für die biologische Reinigung relevante Stoffgruppen. Es beschreibt Stoffumsetzungen beim CSB- und Stickstoffabbau und deren Geschwindigkeit.

Die Konzentrationen der Stoffgruppen des Modells werden durch die Stöchiometrie und Kinetik von acht unterschiedlichen biochemischen Umwandlungsprozessen beeinflusst.

3 Vorstellung eines Simulationssystems

Der Modellansatz „Activated Sludge No. 1“ hat Eingang in mehrere Softwaresysteme zur Modellierung und Simulation von Belebungsanlagen gefunden. Mit dem Ziel der Offenheit bezüglich neuer Modellansätze, der Berücksichtigung weiterer Prozeßstufen eines Klärwerks sowie der Einbeziehung von Regelungen und Steuerungen wurde die Modellbibliothek SIMBA [ALE-95] für die Simulationsumgebung MATLAB®/SIMULINK™ entwickelt¹.

Für die Simulation mit dem System MATLAB / SIMULINK werden die wesentlichen Anlagenkomponenten für Belebtschlamm-Kläranlagen als Modellblöcke in einer Modellbibliothek

¹MATLAB® und SIMULINK™ sind eingetragene Warenzeichen von The MathWorks Inc., Natick, U.S.A.

durch SIMBA (Bild 1) zur Verfügung gestellt.

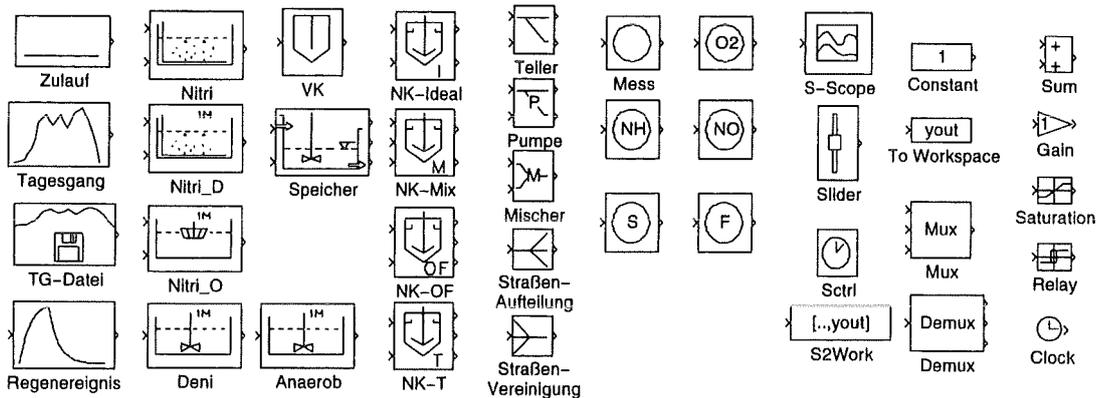


Abbildung 1: Modellbibliothek

Diese Blöcke können, entsprechend der Technologie der zu modellierenden Anlage, beliebig verschaltet werden. Die Blöcke lassen sich in die Gruppen Zulauf, Belebungsbecken, Vor- und Nachklärbecken, Verteilerbauwerke und Meß-, Steuer- und Anzeigeblöcke einteilen.

Modellierung des Zulaufes

Zulauf Der Block Zulauf modelliert einen konstanten Abwasserzulauf mit ebenfalls konstanten Konzentrationen (Frachten).

Tagesgang Der Block Tagesgang erzeugt zu jedem Simulationszeitpunkt einen Signalvektor, der den variablen Abwasserzufluß einer Kläranlage beschreibt.

TG-Datei Der Block TG-Datei generiert aus in einer ASCII-Datei gespeicherten Konzentrations- und Volumenstromwerten einen variablen Zulauf.

Regenereignis Der Block Regenereignis dient zur Modellierung eines Regenereignisses im Einzugsgebiet der Kläranlage.

Belebungsbecken

Die Modellblöcke Nitri, Nitri_D, Nitri_O, Deni und Anaerob modellieren Belebtschlammbecken mit allen darin ablaufenden biologischen und chemischen Teilprozessen. Weiterhin wird im Block Nitri und Nitri_D ein Luftertrag durch eine Druckbelüftung berücksichtigt. Der Block Nitri_O modelliert ein Becken mit Oberflächenbelüftung.

Vor- und Nachklärbecken

VK Dieser Vorklärer wurde entsprechend [OTT-94] modelliert. Es wird neben der Pufferung des Zulaufes eine mechanische Reduktion von partikulärem CSB und Stickstoff realisiert. Diese Reduktion erfolgt in Abhängigkeit der Verweilzeit entsprechend einer empirischen Kennlinie.

NK-Ideal Dieser Block modelliert einen idealen Nachklärer (siehe z.B. [GUJ-85]), d.h. ein Nachklärbecken, in dem im Ablauf keine partikulären Bestandteile mehr enthalten

sind. Darüber hinaus wird keine Speicherung von Schlamm modelliert. Damit ist dieses einfache Modell allerdings nicht zur Simulation der Abflußwerte und auch nicht zur Modellierung des Schlammhaushaltes der Kläranlage geeignet.

NK-Mix Der Block NK-Mix modelliert die Speicherung von Schlamm durch einen einfachen Rührkessel-Ansatz, ohne die Absetzeffekte im Nachklärbecken zu beschreiben. Der Feststoffgehalt im Ablauf wird über einen zusätzlichen Modelleingang vorgegeben.

NK-OF Das Modell NK-OF nach [OTT-92], geht von einer Zerlegung des Nachklärbeckens in horizontale Schichten mit konstanten Volumina aus. In diesen Schichten wird jeweils vollständige Durchmischung, eine Klassifikation der Schlammflocken in Makro- und Mikrofloccen mit jeweils unterschiedlichem Absetzverhalten und eine von der Schlammkonzentration (TS-Gehalt) abhängige Sinkgeschwindigkeit der Makro-Floccen angenommen.

NK-T In dem Block NK-T wird ein Modellansatz nach [TAK-91] umgesetzt. Dieser Modellansatz geht ebenfalls von einer Zerlegung des Nachklärbeckens in horizontale Schichten mit konstanten Volumina aus. In diesen Schichten wird jeweils vollständige Durchmischung und eine von der Schlammkonzentration (TS-Gehalt) abhängige Sinkgeschwindigkeit der Floccen angenommen. Die Funktion der Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration ist in diesem Modellansatz so gewählt (zwei exponential Terme), daß eine Abbildung des Abtriebs feiner Feststoffpartikel, wie auch im Block NK-OF, möglich wird.

Verteilerbauwerke

Der Modellblock Mischer gestattet die Zusammenführung zweier Abwasserströme und realisiert eine ideale Vermischung. Der Block Teiler teilt einen Abwasserstrom in zwei Teilströme auf.

Die Blöcke Straßen-Aufteilung und Straßen-Vereinigung dienen zur vereinfachten Modellierung mehrstraßiger Anlagen.

Messen, Steuern und Anzeigen

Der Block Mess zweigt aus einem Signalvektor zur Beschreibung eines Abwasserstroms ein einzelnes, auszuwählendes skalares Signal ab. Dieses Signal kann zur Steuerung, Regelung, zur Protokollierung usw. herangezogen werden.

Der Block O₂ ermittelt die Konzentration des gelösten Sauerstoffs, der Block NH die Ammonium-Stickstoff-Konzentration, der Block NO die Nitrat-, Nitrit-Stickstoff-Konzentration, der Block S den TS-Gehalt und der Block F schließlich den Volumenstrom eines Abwasser- bzw. Belebtschlammstroms.

Der Block Slider bildet einen Schieberegler nach. Damit kann, durch Vorgabe des Wertes einer Stellgröße, in laufende Simulationen eingegriffen werden.

Mit dem Block S-Scope können beliebige Signale während der Simulation grafisch dargestellt werden.

Der Block Sctrl ist ein Hilfsblock und dient zur Übertragung der aktuellen Simulationszeit in die SIMBA-Experimentieroberfläche und ermöglicht das kontrollierte Abbrechen von Simulationsläufen.

Der Block S2Work schließlich zeichnet die angeschlossenen Signale in Variablen der MATLAB - Arbeitsfläche auf.

Zusätzlich zu den aufgeführten Modell-Blöcken wurden einige häufig benötigte SIMULINK - Blöcke mit in das SIMBA-Modellbibliotheks-Fenster aufgenommen.

Simulationsoberfläche

Neben der Blockbibliothek wird die Basissoftware MATLAB / SIMULINK durch eine Simulationsoberfläche erweitert, die folgende Funktion implementiert:

- grafische Benutzerschnittstelle (GUI)
- Verwaltung von Modell-Zuständen
- zugeschnittene Visualisierungswerkzeuge
- Verzeichnisverwaltung
- Implementierung verschiedener Simulationsbetriebsarten

4 Modell einer Beispielanlage

Das im folgenden dargestellte Beispiel soll den Einsatz der dynamischen Simulation für die Entwicklung und Verbesserung von Steuerungs- und Regelungskonzepten veranschaulichen.

Das in Bild 2 dargestellte Modell bildet eine 18.000 EWG-Anlage (EWG Einwohner Gleichwerte) nach.

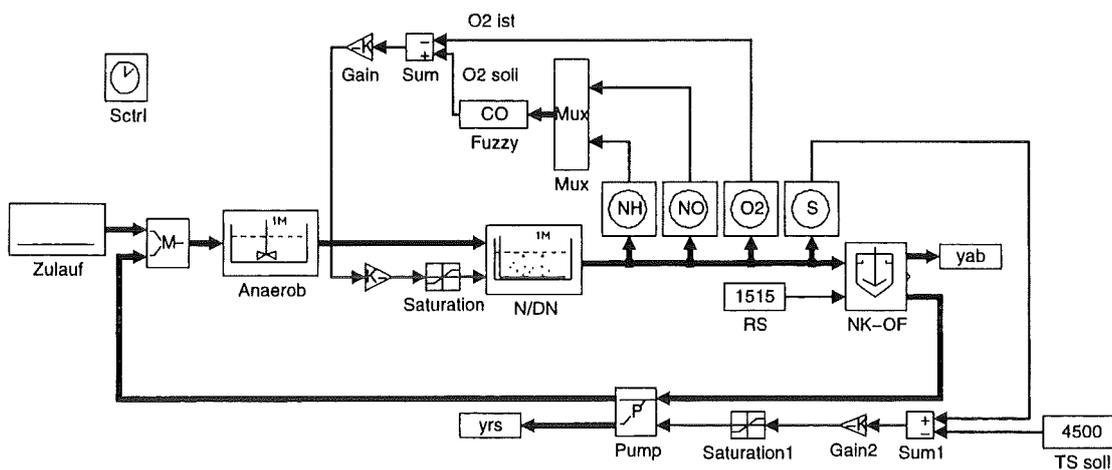


Abbildung 2: SIMBA-Signalflußplan der Beispielanlage mit intermittierender Belüftung

Der Zulauf wird hier als konstanter Strom (mittlerer Trockenwetterzulauf) mit konstanter Zusammensetzung modelliert (Block Zulauf). Diese Vereinfachung erleichtert den Vergleich unterschiedlicher Regelungskonzepte.

Zusammen mit dem Rücklaufschlamm wird der Zulauf in das Anaerobbecken (Block Anaerob) geleitet. Der Ablauf des Anaerob-Beckens wird in das intermittierend belüftete Nitrifikations- /Denitrifikationsbecken und anschließend in das Nachklärbecken (Block NK-OF) geführt.

Der Rücklaufschlamm wird nach Entnahme des Überschussschlammes (Block Pump) in das Anaerobbecken und der Abfluß in den Vorfluter geleitet.

Am Anlagenmodell sind verschiedene Regelungen installiert:

Rücklaufschlamm: Vorgabe eines konstanten Rücklaufschlammvolumenstroms mit einem Rücklaufverhältnis $RV = 100\%$ bei mittlerem Trockenwetterzulauf

Überschussschlamm: Die Stellgröße Überschussschlammvolumenstrom wird zur Regelung des TS-Gehaltes im Belebungsbecken benutzt (P-Regler).

O₂-Gehalt: Der Sauerstoffgehalt im Belebtecken wird über einen P-Regler auf den vom Belüftungsregler vorgegebenen Wert (0 oder 2 mg/l) geregelt.

Belüftung Die intermittierende Belüftung wird über einen Fuzzy-Regler geschaltet.

5 Erprobung von Regelungskonzepten

Die Wirkungsweise eines Fuzzy-Reglers zur Steuerung der Belüftung der Beispielanlage wurde mit Hilfe des Simulationsmodells (s. Bild 2) erprobt.

Als Vergleichsgrundlage wurde alternativ ein Zweipunktregler simuliert, der folgendes Schaltregime implementiert: Steigt der Ammoniumgehalt über 3 mg/l, wird die Belüftung eingeschaltet. Sinkt der Ammoniumgehalt unter 1 mg/l, wird wieder ausgeschaltet. Mit dem in [ALE-94b] und [ALE-94] vorgestellten Fuzzy-Regler sollen die Nachteile eines derartigen starren Zweipunktreglers überwunden werden.

Auch der Fuzzy-Regler soll nur zwischen belüfteten und unbelüfteten Phasen umschalten (s. Bild 3). Der Regler ist entweder im Zustand *belüftet* oder im Zustand *unbelüftet*. Dement-

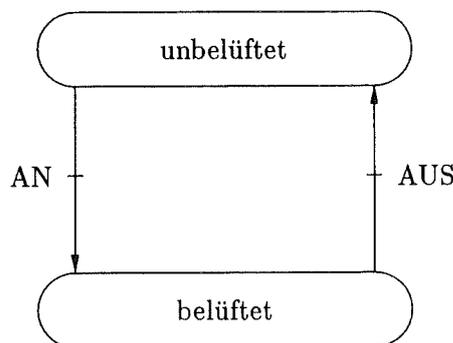


Abbildung 3: Automatengraph

sprechend wird der Sollwert 0 mg/l oder 2 mg/l für den unterlagerten Sauerstoff-Regelkreis

The image shows two side-by-side windows titled "Spreadsheet Rule Editor" from the "fuzzyTECH 3.1 Precompiler Edition FF,FTL" software. Each window contains a table with the following structure:

Matrix	IF		THEN	
Utilities	nox	ver	DoS	aus/an
1	sk	g	1.00	nein/ja
2	sk	m	1.00	nein/ja
3	sk	k	1.00	nein/ja
4	n	g	1.00	nein/ja
5	n	m	1.00	nein
6	n	k	1.00	ja

Abbildung 4: Regelbasis

vorgegeben. Für die Entscheidungen zum AN- oder AUS-Schalten werden Fuzzy-Regeln aufgestellt, wobei folgende Aspekte Berücksichtigung finden:

- Minimierung der Gesamtstickstoffsfracht im Ablauf bei variabler Belastung,
- Die Entfernung von Ammonium-Stickstoff hat Vorrang vor der Nitrat-Stickstoffelimination und
- Vermeidung anaerober Zustände im Belebungsbecken zur Vermeidung von Phosphatrücklösung.

Für die Formulierung von Regeln sind die Signale des Fuzzy-Systems durch linguistische Variablen mit einer Anzahl von Termen zu beschreiben. Als Eingangssignale werden die Nitratkonzentration (Variable NOX) und das Verhältnis der Ammonium- zur Nitratkonzentration (Variable VER) verwendet. Für die Nitratkonzentration NOX werden die Terme *sehr klein* (sk) und *normal* (n) verwendet. Das Verhältnis VER soll durch die Terme *klein*, *mittel* und *groß* (k, m, g) beschrieben werden. Die Ausgangssignale des Reglers sind die Variablen AN und AUS, die jeweils durch die Terme *ja* und *nein* (j, n) charakterisiert werden.

Für die Entscheidung über das Einschalten der Belüftung (Variable AN) werden einfache Regeln nach folgendem Schema formuliert:

Wenn das Verhältnis von Ammonium zu Nitrat *groß* ist
und die Nitratkonzentration *sehr klein* ist
dann ist AN gleich *ja*.

In Bild 4 ist die Regelbasis tabellarisch zusammengefaßt. Es existieren jeweils drei Regeln zur Steuerung der Belüftung unter „normalen“ Nitrat-Konzentrationen mit dem Ziel, das Verhältnis von Ammonium- zu Nitrat-Stickstoff etwa auf dem Wert eins halten. Die restlichen jeweils drei Regeln dienen der Vermeidung anaerober Zustände im Belebungsbecken bei niedrigen Nitratkonzentrationen.

Dieser Fuzzy-Regler bewirkt trotz seines sehr einfachen Aufbaus eine deutlich bessere Steuerung der Stickstoffelimination als der Zweipunktregler (s. Bild 5).

Unter normalen Zuflußbedingungen entspricht die Pendelung der Ammonium- und Nitratkonzentration mit dem Fuzzy-Regler (Bild 5b) qualitativ dem Verhalten mit dem Zweipunktregler (Bild 5a). In diesem statischen Arbeitspunkt ist auch mit der ausgefeiltesten Steuerung keine Verbesserung gegenüber einem Zweipunktregler mit günstig gewählten Schaltpunkten zu erreichen.

Diese Situation ändert sich im Fall nicht mehr konstanter Last. In Bild 5d ist das Verhalten des Fuzzy-Reglers bei erhöhter Last ($Q_{zu} = 5.050 \text{ m}^3/\text{d}$) dargestellt. Gegenüber dem in Bild 5c dargestellten Verhalten des Zweipunktreglers, gelingt es dem Fuzzy-Regler, die Nitratkonzentration und damit die Summe des gesamten anorganischen Stickstoffs in engeren Grenzen zu halten. Die Gesamt-Stickstoffkonzentration wird um über 30 % gesenkt. Diese Verbesserung ist mit nur einer geringfügig höheren Ammonium-Konzentration verbunden. Diese flexible Reaktion des Fuzzy-Reglers zeigt sich auch bei einer Absenkung der Last auf $Q_{zu} = 1.515 \text{ m}^3/\text{d}$. Auch in diesem Fall (s. Bild 5f) wird die Gesamt-Stickstoffkonzentration gegenüber Bild 5e verbessert (um ca. 20 %). Von größerer Wichtigkeit ist in diesem Fall das Vermeiden anaerober Zustände. Am Verlauf der gestrichelt gezeichneten NO_3 -Stickstoffkonzentration, die immer über 1 mg/l liegt, wird, im Gegensatz zum Zweipunktregler, die sichere Einhaltung dieser Forderung sichtbar.

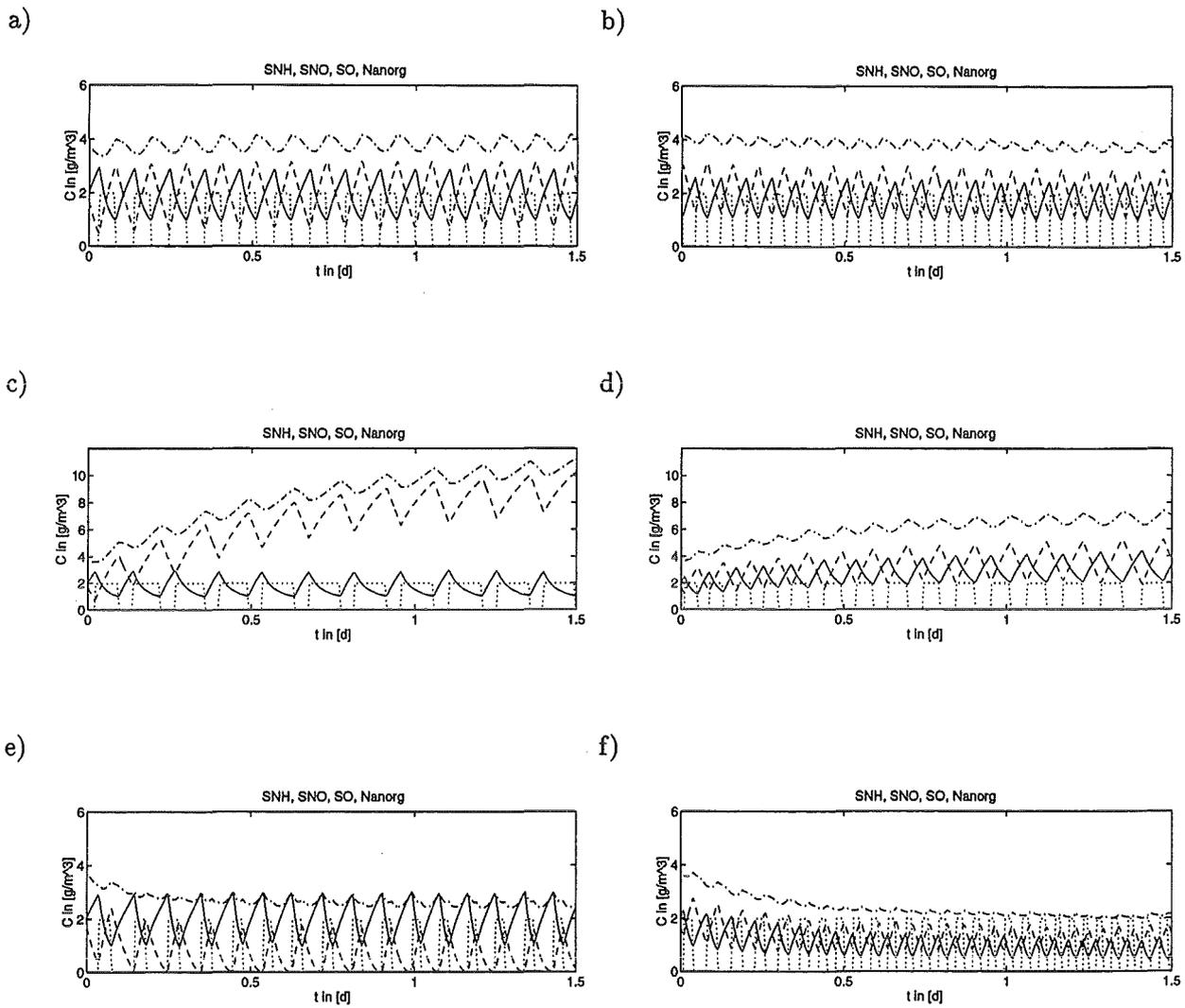


Abbildung 5: Simulationsergebnisse

(Links - Zweipunktregler, Rechts - Fuzzy-Regler
 Oben - normale Last (mittlerer Trockenwetterzufluß),
 Mitte - Erhöhte Last (Verdopplung des Zuflusses),
 Unten - Verringerte Last (Halbierung des Zuflusses))

- ... Konzentration O_2
- Konzentration $NO_{2,3}$ -Stickstoff
- Konzentration NH_4^+ -Stickstoff
- .- Konzentration Summe NH_4^+ , $NO_{2,3}$ -Stickstoff

6 Zusammenfassung

Dynamische Simulation von Kläranlagen

Die Methode der dynamische Simulation ist insbesondere in der chemischen Verfahrenstechnik bereits seit vielen Jahren fest etabliert. Die Nutzung von Simulationstechniken sowohl für die Planung als auch für den Betrieb von biologischen Kläranlagen steht demgegenüber erst am Anfang. Eine wachsende Bedeutung ist jedoch zu erwarten.

Ein ausgewähltes Simulationssystem, das unkompliziert und komfortabel handhabbar und auf einem PC lauffähig ist, wurde im Überblick vorgestellt und in seiner Anwendung auf Untersuchungen an einer realen Kläranlage demonstriert. Neben der Analyse und Synthese von Steuerungs- und Regelungsstrukturen, der simulativen Erprobung optimierter Automatisierungskonzepte und der Unterstützung bei der Entwicklung neuer, flexibler Betriebsführungsstrategien ist das Simulationssystem auch hilfreich, um tiefere Einblicke in wesentliche interne Vorgänge des komplexen Prozesses der biologischen Abwasserreinigung zu erhalten. Die Simulation leistet damit einen Beitrag zum besseren Prozeßverständnis, das stets der Ausgangspunkt einer jeden Anlagenoptimierung sein sollte.

Eine dynamische Simulation typischer instationärer Belastungssituationen ist mit einem geeigneten Simulationssystem auf relativ einfache Weise am Computer möglich. Oftmals sind hierbei schnell qualitativ bedeutsame Aussagen ableitbar. Die Exaktheit quantitativer Aussagen wird naturgemäß wesentlich durch die Verfügbarkeit ausreichenden Datenmaterials zu den untersuchten Belastungssituationen (veränderte Frachten etc.) beeinflusst. Der besonders für die Modellkalibrierung nicht unerhebliche Meß- und Analyseaufwand wird jedoch zumeist durch den erzielbaren Nutzen gerechtfertigt.

Bereits in der Planungsphase von Anlagen können mit den zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Informationen unter weitgehender Nutzung von Standardannahmen und Standardparametern mit erträglichem Aufwand Simulationsmodelle erstellt werden, die für prinzipielle Untersuchungen zum Reinigungsverhalten und zu Automatisierungsstrukturen durchaus geeignet sind.

Die Parametervielfalt solcher Modellansätze wie des weit verbreiteten „Activated Sludge Model No. 1“ der International Association on Water Quality (IAWQ) ist bei entsprechender Erfahrung und Einsicht in die Modellzusammenhänge beherrschbar. Zahlreiche erfolgreiche Anwendungen dieses Modell-Kerns als Ausgangspunkt für die dynamische Simulation von Belebtschlamm-Kläranlagen verschiedener Größe und Verfahrensgestaltung belegen dies.

Anwendungsbeispiel

Mit einer lastabhängigen Steuerung der Stickstoffelimination lassen sich deutliche Verbesserungen der Gesamtstickstoffelimination und des Energieverbrauchs bei erhöhter Zuverlässigkeit in Extremsituationen erreichen. Voraussetzung für eine derartige Steuerung ist die Möglichkeit, dynamisch die Aufteilung zwischen Beckenvolumen mit aeroben und anoxischem Milieu zu verschieben sowie das Vorhandensein von Informationen über den momentanen Lastzustand der Kläranlage (spezifische Betriebsmeßgrößen, hier: Ammonium- und Nitratstickstoff).

Die Funktion der beschriebenen Regler ließe sich auch mit anderen Methoden nachbilden. Der Vorteil der regelbasierten Formulierung mit Fuzzy-Control liegt vor allem in einer transparenten, nachvollziehbaren Präsentation der Reglerfunktion, die geeignet ist eine Verständli-

gungsbrücke zwischen dem Regelungstechniker, dem verfahrenstechnischen Planer und dem Betreiber der Kläranlage zu schlagen. Außerdem bietet dieser Ansatz eine einfache Möglichkeit, weitere Bedingungen, wie z.B. die Berücksichtigung des momentanen Energieverbrauchs zur Vermeidung von Verbrauchsspitzen (Bandenergie) oder die momentanen Ressourcen der Belüftungsaggregate, einzubeziehen.

Literatur

- [ALE-94] Alex, J.; Tschepetzki, R.: *Konzeptionelle Vorarbeiten und Projektierungsrichtlinien zum Einsatz von Fuzzy-Regelungen bei der Automatisierung moderner Anlagen zur Abwasserreinigung*. Abschlußbericht zu einem vom Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Landes Sachsen-Anhalt geförderten Vorhaben (FKZ 687A12112). Institut für Automation und Kommunikation, Magdeburg 1994.
- [ALE-94b] Alex, J.; Jumar, U.; Tschepetzki, R.: *A Fuzzy Control Application to Waste Water Treatment Plants*. 3rd IEEE Conference on Control Applications, Glasgow, U.K., August 24.-26., 1994. Proceedings, Vol. 1, pp. 665-670.
- [ALE-95] Alex, J.; Tschepetzki, R.: *SIMBA 2.1 - Simulation der biologischen Abwasserreinigung unter MATLAB®/SIMULINK™*. Handbuch, Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg, Januar 1995.
- [GUJ-94] Gujer, W.; Henze, M.; Mino, T.; Matsuo, T.; Wentzel, M.C.; Marais, G.v.R.: *The Activated Sludge Model No. 2: Biological Phosphorus Removal*. IAWQ Specialised Seminar „Modelling and Control of Activated Sludge Processes“ 22. - 24. August 1994, Copenhagen.
- [HÄR-90] Härtel, L.: *Modellansätze zur dynamischen Simulation des Belebtschlammverfahrens*. Dissertation, TH-Darmstadt, WAR-Schriftenreihe, Band 47, 1990.
- [HEN-87] Henze, M.; Grady Jr, C.P.L.; Gujer, W.; Marais, G.v.R.; Matsuo, T.: *Activated sludge Model No.1*. IAWPRC Scientific and Technical Report No.1, IAWPRC task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment, London 1987.
- [HEN-94] Henze, M.; Gujer, W.; Mino, T.; Matsuo, T.; Wentzel, M.C.; Marais, G.v.R.: *The Activated Sludge Model No. 2*. IAWQ Scientific and Technical Reports, Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment, London, June 1994, pp. 1 - 9-3.
- [HOE-94] Hoen, K.; Schuhen, M.; Köhne, M.: *Dynamische Simulation von Kläranlagen*. Korrespondenz Abwasser 41(1994)
- [KÖH-88] Köhne, M.; Seibert, G.; Zoll, S.; Hoen, K.: *Optimierung meß- und regelungstechnischer Einrichtungen in Abwasserreinigungsanlagen am Beispiel der Belebungsanlage des Klärwerks Siegen*. Abschlußbericht IMR-Bericht 15-90 Universität Siegen, Institut für Mechanik und Regelungstechnik 1988.
- [LAD-91] Ladiges, G.: *Modellansätze als Grundlage zukünftiger Betriebsführung auf Kläranlagen*. Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum 22(1991) S. 159-176.

- [OTT-90] Otterpohl, R.: *Dynamische Simulation von Kläranlagen – Grundlagen, Voraussetzungen und Möglichkeiten*. Hannover: SuG-Verlagsgesellschaft 1990, H. 10, S. 3–10.
- [OTT-92] Otterpohl, R.; Freund, M.: *Dynamic Models for Clarifiers of Activated Sludge Plants with Dry and Weather Flows*. Water Science and Technology Vol. 26(1992), No. 5–6, pp. 1391–1400.
- [OTT-94] Otterpohl, R.; Freund, M.: Möglichkeiten der Kosteneinsparung mit Hilfe der dynamischen Simulation von Kläranlagen. Magdeburger Abwassertage 1994, Tagungsband.
- [OTT-94b] Otterpohl, R.; Raak, M.; Rolfs, Th.: *A Mathematical Model for the Efficiency of the Primary Clarification*. IAWQ 17th Biennial Int. Conference, Budapest Hungary, 24.-30. July 1994.
- [PAT-89] Patry, G.G.; Chapman, D.: *Dynamic Modelling and Expert Systems in Wastewater Engineering*. Michigan: Lewis Publishers 1989.
- [SCH-88] Schilling, W.; Hartwig, P.: *Simulation von Reinigungsprozessen in Belebungsanlagen mit Mischwasserzufluß*. gwf Wasser-Abwasser 129(1988), H. 8, S. 513–524.
- [TAK-91] Takacs, G.; Patry, G.G; Nolasco, D.: *A dynamic model of the clarification-thickening processes*. IAWPRC Scientific and Technical Report No.1, Wat. Res. Vol.25, No.10, pp.1263–1271, Great Britain 1987.

Parallele Simulation von Grundwasserströmungen

Peter-Wolfgang Gräber & Ingo Schäfer

Technische Universität Dresden
Institut für Grundwasserwirtschaft
MommSENstr. 13 D - 01062 Dresden
Tel.: (0351) 25 797 0 Fax: (0351) 25 797 14
Email: graeber@hgwrs1.wasser.tu-dresden.de

Zusammenfassung

Die Simulation von Prozessen des Boden- und Grundwasserbereiches ist eine der Voraussetzungen für die Steuerung und Überwachung solcher Anwendungsfälle wie Förderbrunnen in Wasserwerken oder Entwässerungssysteme in Tagebauen oder Baugruben sowie für die Sanierung von Altlasten und Deponien. Die in diesem Zusammenhang betrachteten physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse werden mathematisch durch ein System partieller Differentialgleichungen beschrieben. Um diese partiellen Differentialgleichungen lösen zu können, ist die Lösung großer Gleichungssysteme $Ax = b$ notwendig. Dies stellt einen Engpaß im Hinblick auf möglichst schnelle und effiziente Simulationssysteme dar. Aus diesem Grund richtete sich das Augenmerk in dieser Arbeit vor allem auf diesen Teil der Simulation, ohne dabei jedoch das Gesamtproblem zu vernachlässigen. In den letzten Jahren spielten neben den Mehrgitterverfahren besonders cg(conjugate gradients)-Verfahren einschließlich der entsprechenden Vorkonditionierungen eine große Rolle, wenn es darum ging, schnelle und robuste Löser für die o.a. Gleichungssysteme zu entwickeln. So entstanden Algorithmen, die eine sinnvolle Nutzung auch für die Parallelverarbeitung zuließen. Der Inhalt dieser Forschungsarbeit bestand darin, einen solchen Algorithmus auf dem Power-Explorer zu implementieren, zu testen und Aussagen über das Lösungsverhalten zu machen. Neben den numerisch relevanten Aspekten des Algorithmus sollen dabei vor allem Probleme der eigentlichen parallelen Umsetzung im Vordergrund stehen. Dies betrifft u.a. Fragen zum parallelen Abarbeitungsmodell, zur Kommunikation sowie zur Synchronisation. Weiterhin soll mit den Untersuchungen geklärt werden, inwieweit sich der Einsatz eines Parallelrechners für die konkreten Anwendungen der Nutzer lohnt.

1. Grundlagen

In der Boden- und Grundwasserzone finden physikalische und/oder chemische aber auch biologische Prozesse statt. Diese Prozesse müssen besonders im Zusammenhang mit

- Förderbrunnen in Wasserwerken
 - Entwässerungssystemen in Tagebau- und Baugruben und
 - Sanierungen von Altlasten und Deponien
- überwacht und gesteuert werden.

Das mathematische Modell besteht aus einem System von gewöhnlichen und partiellen Differential- und algebraischen Gleichungen. Die besondere Schwierigkeit besteht darin, daß die Koeffizienten nichtlinear, zeit- und ortsvariant sind. Die Vielzahl der Gleichungen kann als Kombination von zwei nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen 2. Ordnung dargestellt werden.:

- die Wärmeleitungs-Gleichung

$$\operatorname{div}(\mathbf{T} \operatorname{grad} h) = S \frac{\delta h}{\delta t} - w,$$

- und die Konvektions-Diffusions-Gleichung

$$\operatorname{div}(\bar{\mathbf{D}} \operatorname{grad} P - \bar{\mathbf{v}} P) = (n_0 + \alpha) \frac{\delta P}{\delta t} - w_g.$$

Um die u.a. bei der Simulation hydrogeologischer Vorgänge nötige Behandlung partieller Differentialgleichungen durchführen zu können, ist deren Überführung, genauer gesagt die Diskretisierung der Kontinuen, in ein System linearer Gleichungen erforderlich. Die gängigsten Methoden dazu sind FEM und FDM.

Angesichts der Größe der Gleichungssysteme wurde das Augenmerk bezgl. direkter oder iterativer Verfahren von Anfang an auf letztere gerichtet. Auf Grund der in der Literatur /5/ beschriebenen guten Konvergenz- sowie Parallelisierungseigenschaften lag die Aufmerksamkeit vor allem beim cg-Verfahren. Es beruht auf einer sukzessiven Approximation der Lösung x des Gleichungssystems als Minimierungsproblem.

Der im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung gekommene cg-Algorithmus für Parallelverarbeitung stammt dem Ansatz nach von Law /5/ und wurde von Meyer /6/ weiterentwickelt. Grundlage für die Parallelisierung ist eine Gebietszerlegung ohne Überlappung.

Start: Wähle x_0^* und berechne

(\leftrightarrow Kommunikation)

$$1. r_0 = b - Ax_0^*$$

(C - Vorkonditionierung)

$$2. q_0^* = w_0^* = C^{-1} r_0$$

(\leftrightarrow)

(ε - Abbruchschranke)

$$3. \gamma_0 = r_0 w_0^*$$

(\leftrightarrow)

Iteration: Berechne für $k = 1, 2, \dots$:

$$1. v_k = Aq_{k-1}^*$$

$$2. \delta_k = v_k q_{k-1}^*$$

(\leftrightarrow)

$$3. \alpha_k = \frac{-\gamma_{k-1}}{\delta_k}$$

$$4. x_k^* = x_{k-1}^* + \alpha_k q_{k-1}^*$$

$$5. r_k = r_{k-1} + \alpha_k v_k$$

$$6. w_k^* = C^{-1} r_k$$

(\leftrightarrow)

$$7. \gamma_k = r_k w_k^*$$

(\leftrightarrow)

$$8. \gamma_k \leq \varepsilon^2 \gamma_0 ? \quad \text{nein} \rightarrow \text{goto 1.}$$

ja \rightarrow stop

$$9. q_k^* = w_k^* + \frac{\gamma_k}{\gamma_{k-1}} q_{k-1}^*$$

Alle Vektoren sind knotenpunktorientiert und die Prozessoren besitzen nur die zu ihrem Gebiet Ω_i gehörenden Anteile an diesen Vektoren. Hinsichtlich der Punkte auf dem Koppelrand sind jedoch zwei Speicherformen zu unterscheiden:

1. Für die Vektoren r_k, b_k, v_k (Typ 1) kommt eine sogenannte akkumulierte Speicherung zur Anwendung, d.h. bei den zum Koppelrand gehörenden Komponenten verfügt jeder der zueinander benachbarten Prozessoren nur über einen lokalen Wert. Der globale Wert für einen Koppelknoten berechnet sich aus der Summe der lokalen Werte aller Prozessoren, die diesen Knoten gemeinsam besitzen.
2. Bei den Vektoren x_k^*, q_k^*, w_k^* (Typ 2) liegen alle Komponenten, auch die zum Koppelrand gehörenden, mit ihren globalen Werten auf den Prozessoren vor.

In Bezug auf die Wahl der Vorkonditionierung ist natürlich anzustreben, daß ein möglichst geringer Kommunikationsbedarf für die Lösung von $Cw_{k+1}^* = r_{k+1}$ beansprucht wird. Gleichzeitig muß aber berücksichtigt werden, daß durch eine schlechtere Vorkonditionierung die Anzahl der cg-Iterationen und damit auch die Gesamtkommunikation u.U. deutlich ansteigt.

Hinsichtlich der Kommunikationssysteme im Parallelrechner ergibt sich aus dieser Lösungsstrategie die Forderung nach relativ niedrigem start-up-Zeiten für Kommunikationen mit geringen Datenmengen.

Vorkonditionierung

Eine Möglichkeit, das Konvergenzverhalten von Iterationsverfahren zu verbessern, besteht in der Vorkonditionierung. Sie stellt kein eigenständiges Lösungsverfahren dar, sondern wird lediglich zur Verbesserung der Konvergenz des Basisverfahrens, in diesem Falle das cg-Verfahren, eingesetzt. Grundlage dafür ist eine Verbesserung der Kondition des Problems, d.h. konkret, die Konditionszahl der A-Matrix des Gleichungssystems wird verringert.

Es existieren viele verschiedene Möglichkeiten der numerischen Umsetzung der Vorkonditionierung. Zwei davon wurden hier behandelt, zum einen die hierarchische Vorkonditionierung und zum anderen die SSOR-Vorkonditionierung.

Hierarchische Vorkonditionierung

Der Ausgangspunkt für die hierarchische Vorkonditionierung nach Yserentant /7/ ist, wie oft bei Multigrid-ähnlichem Herangehen, eine Geometriebeschreibung des zu behandelnden Gebietes Ω_i in Form einer Grobvernetzung. Die dabei entstehenden Drei- bzw. Vierecke sollen die Geometrie von Ω_i einschließlich seiner Schnittstellenstrukturen ausreichend genau beschreiben. Weiterhin sollte die Grobvernetzung als Grundlage für die Definition der Teilgebiete verwendet werden können, wobei es vorteilhaft ist, wenn die Elementzahl im Grobnetz ein ganzzahliges Vielfaches der Anzahl der Prozessoren beträgt, da dies dem Ziel einer balancierten Verteilung des Rechenaufwandes auf den Prozessoren entspricht.

Nach der Grobvernetzung folgt nun die eigentliche Konstruktion der hierarchischen Basis, auf die hier allerdings nicht näher eingegangen werden soll, entsprechende Angaben findet man in /6/. Da die hierarchische Basis nur von der Geometrie des dem Gleichungssystems zugrundeliegenden Gitters abhängig ist, muß die Basis für Gleichungssysteme mit ein und demselben Gitter auch nur einmal konstruiert werden.

Die Grundidee der hierarchischen Vorkonditionierung basiert vor allem auf der Erkenntnis, daß die zur hierarchischen Basis gehörige Steifigkeitsmatrix \tilde{A} (für elliptische Operatoren) eine relativ kleine Konditionszahl $\text{cond}(\tilde{A})$ besitzt. Da jedoch die Matrix \tilde{A} fast voll besetzt ist, kommt eine Diskretisierung in dieser Basis nicht in Betracht. Mit Hilfe der Basistransformation

$$\tilde{A} = \tilde{V}^T K \tilde{V}$$

läßt sich jedoch zeigen, daß

$$\text{cond}(\tilde{A}) = \text{cond}(\tilde{V}^T K \tilde{V}) = \text{cond}(\tilde{V} \tilde{V}^T K).$$

Daraus folgt

$$C = \tilde{V}^{-T} \tilde{V}^{-1} \Rightarrow C^{-1} = \tilde{V} \tilde{V}^T,$$

was eine gute Vorkonditionierung für A darstellt. Von besonderer Wichtigkeit ist die Tatsache, daß die beiden Matrizenmultiplikationen bei der Anwendung von C^{-1} außerordentlich effektiv realisierbar sind. Die Multiplikationen eines Vektors y mit V erfordert somit lediglich die Operationen

$$y(i_s) = y(i_s) + f y(i_{v_1}) + (1-f) y(i_{v_2}),$$

wobei die entsprechenden Indizes aus der hierarchischen Liste zu entnehmen sind. Bei der Multiplikation mit \tilde{V}^T wird die hierarchische Liste in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen. Die Berechnungen lauten:

$$y(i_{v_1}) = y(i_{v_1}) + f y(i_s)$$

$$y(i_{v_2}) = y(i_{v_2}) + (1-f) y(i_s).$$

Die Anwendung der hierarchischen Vorkonditionierung in Gestalt von C^{-1} erfordert somit lediglich einen arithmetischen Mehraufwand von $4N$ Additionen und $2N$ Multiplikationen gegenüber dem nicht vorkonditionierten Fall. Der wichtigste Punkt im Zusammenhang mit der Parallelisierung ist jedoch der, daß nach der Aufteilung der Elemente der Grobvernetzung die o.a. Operationen ohne zusätzlichen Kommunikationsaufwand d.h. völlig parallel auf den einzelnen Teilgebieten zugeordneten Knoten ausgeführt werden können.

Mit der Entwicklung der hierarchischen Vorkonditionierung wurde die Grundlage geschaffen, daß sowohl das cg- als auch das Mehrgitterverfahren für ein breites Feld von Anwendungsfällen, die durch die Diskretisierung partieller Differentialgleichungen entstanden sind, eine nahezu gleichwertige Effektivität aufweisen. Bezgl. paralleler Gleichungssystemlöser ist es sogar gelungen, beim cg-Verfahren trotz einer vorgenommenen hierarchischen Vorkonditionierung den Kommunikationsaufwand gegenüber dem nicht vorkonditionierten Fall unverändert zu halten. Demgegenüber sind bisher keine parallelen Implementationen des Mehrgitterverfahrens bekannt, die nicht wenigstens L (Anzahl der Level der Netzvergrößerung) Kommunikationen pro Iterationsschritt erfordern /4/.

SSOR-Vorkonditionierung

Eine weitere Möglichkeit der Vorkonditionierung besteht in der Anwendung eines anderen Iterationsverfahrens, in diesem Fall Basisiteration genannt, auf dem cg-Verfahren.

Die hier genutzte SSOR-Iteration stellt eine Modifikation der SOR-Iteration dar, deren Charakteristikum die Überrelaxation ist. Bildet man nun das Produkt aus der rückwärts ausgeführten SOR-Iteration und der SOR-Iteration, so erhält man das symmetrische SOR(SSOR)-Verfahren /3/. Die praktische Ausführung der SSOR-Vorkonditionierung entspricht einem Iterationsschritt des SSOR-Verfahrens, wobei als b -Vektor die zu konditionierenden Gradienten einzusetzen sind. Den entscheidenden Nachteil bei der SSOR-Vorkonditionierung im Zusammenhang mit der Parallelisierung stellt der hohe Kommu-

nikationsaufwand dar. Er steigt proportional zur Größe des zu lösenden Gesamtsystems, so daß die Abarbeitung, wie bei der Ergebnisdarstellung zu entnehmen, eher einen Verlust statt einen Gewinn an Zeit bringt. Hinzu kommt noch die nicht durchgängig realisierbare Parallelisierbarkeit bei der Ausführung. Trotzdem wurden die erreichten Resultate mit aufgenommen, um einen Vergleich mit der hierarchischen Vorkonditionierung geben zu können.

2. Aspekte zur Parallelarbeit

Bei dem hier angewandten Parallelisierungsprinzip handelt es sich um die gebräuchlichste Vorgehensweise, die Gebietsaufteilung (domain decomposition), und zwar ohne eine Überlappung an den inneren Grenzen. Die Teilgebietskopplung erfolgt dabei durch das Einsetzen anteiliger Werte an den gemeinsamen inneren Randpunkten und durch Summation der Teilwerte an den entsprechenden Stellen im Lösungsalgorithmus

Als paralleles Abarbeitungsmodell kam das Master-Slave-Prinzip zur Anwendung. Dabei übernehmen der Master bzw. die Slaves die folgenden Aufgaben.

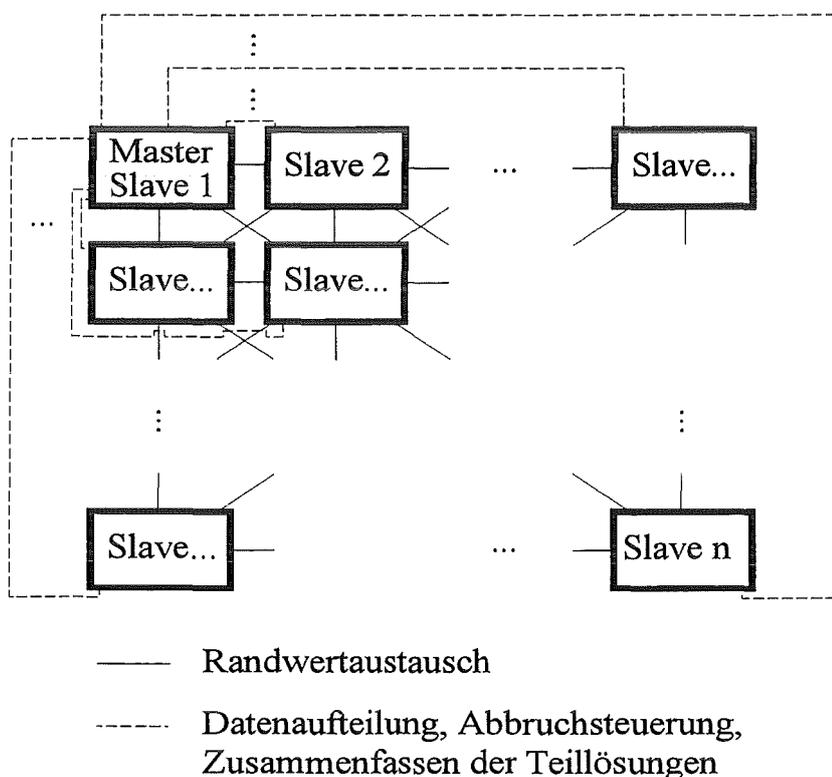


Abb.1: Modell der parallelen Abarbeitung

Aus der Abb.1 erkennt man, daß der Master zugleich auch Slave ist. Desweiteren wird die Struktur und die Funktion der Verbindungen zwischen den einzelnen Knoten deutlich.

Kommunikationssteuerung

Die Programme wurden mit zwei verschiedenen Arten der Kommunikationssteuerung implementiert,

1. die Abwicklung der Kommunikation mit den PARIX-Funktionen *sendnode/recvnode*, bei der zum Zeitpunkt der Kommunikation eine Verbindung zwischen den betreffenden Knoten hergestellt wird.
2. der Aufbau einer Topologie für die Kommunikationsverbindungen. Der eigentliche Nachrichtenaustausch erfolgt dann über die in der Topologie festgelegten Links mittels der PARIX-Funktionen *send/recv*.

Der Einfluß der Topologien hinsichtlich der Zeit für die Kommunikation macht sich bei den hier getesteten Programmen erst ab Prozessorzahlen größer vier bemerkbar. Besonders bei häufiger Kommunikation mit geringen Datenmengen (<1024 Byte) sind dann die Unterschiede zu Gunsten der Topologien recht beachtlich. Dagegen verringert sich der Zeitvorteil der *send/recv*-Variante bei Datenpaketen >1024 Byte, weil ab diesem Wert intern durch das System Topologien aufgebaut werden.

Hinsichtlich der Strukturen bei Kommunikationszyklen Slaves→Master→Slaves (Berechnung des globalen Skalarprodukts) wurden verschiedene Tests durchgeführt. Prinzipiell wurde dabei zwischen sequentiellen, also schleifenartigen, und baumförmigen Strukturen Abb.2 und 3 unterschieden. Bei der sequentiellen Struktur wurden dann noch einmal Modifikationen in der Gestalt vorgenommen, daß getestet wurde, ob bei periodisch auftretenden Slaves-Master-Slaves-Kommunikationszyklen eine Beschleunigung durch wechselnde Masterknoten erzielt werden kann. Ausgangspunkt für diese Überlegung war die Tatsache, daß bei einer starren Zuordnung der Masterknoten zeitlich betrachtet stets als vorletzter Knoten aus dem Zyklus herauskommt, währenddessen er im darauffolgenden Zyklus als erster Knoten auf Empfangsbereitschaft gehen muß. Im Falle eines ausgewogenen Load Balancings von der Größe der Teilsysteme her würde dies zu einer zeitlichen Verzögerung führen, da die zuerst kommunikationbereiten Slave-Knoten auf den Master warten müßten. Für die Verbesserung dieses Zustandes bietet es sich an, eben jenen "ersten" Knoten als Master hinsichtlich des jeweiligen Kommunikationszyklus einzusetzen. Dies macht aber nur so lange einen Sinn, wie die durch die sequentiellen Kommunikationszyklen festgelegte Reihenfolge bestehen bleibt.

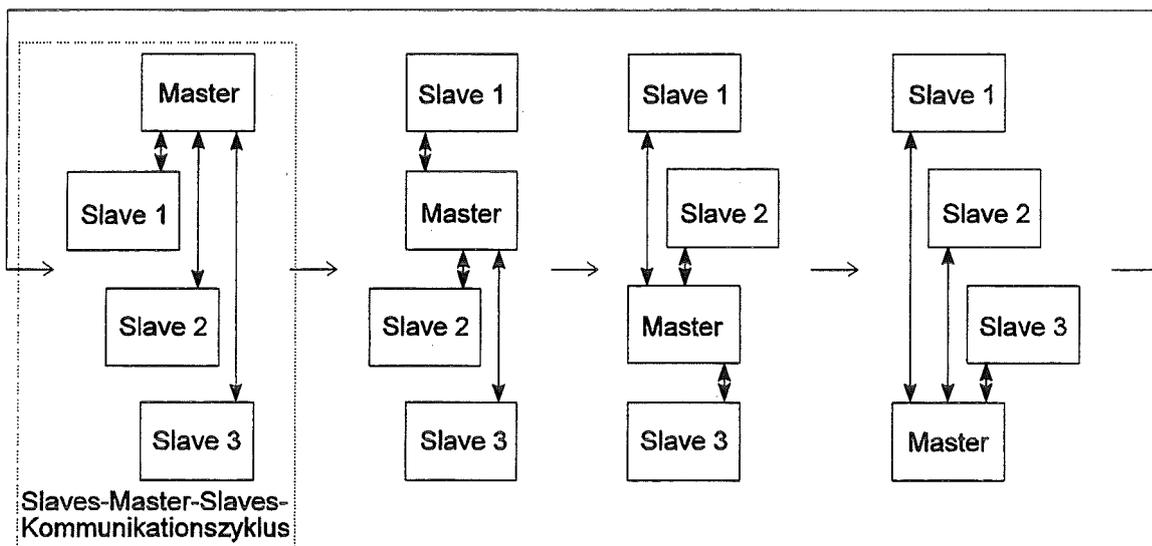


Abb.2: Schema der sequentiellen Kommunikation mit Rotationsprinzip für den Master

Da dies nach einem Randwertaustausch zwischen den Slave-Knoten nicht mehr der Fall ist, kann das Rotationsprinzip für den Masterknoten hinsichtlich der Slaves-Master-Sla-

ves-Kommunikationen dann zurückgesetzt und z.B. mit Knoten 0 als nächstem Master neu begonnen werden.

Die baumartige Kommunikationsstruktur läuft darauf hinaus, die Abarbeitung der für den kompletten Kommunikationszyklus notwendigen Einzelkommunikationsschritte möglichst parallel durchzuführen, so daß die Flaschenhalswirkung des Masterknotens vermindert wird. Wie der Name bereits zum Ausdruck bringt, handelt es sich dabei um ein baumartiges Vorgehen, wobei für die Slaves-Master-Kommunikation in jeder Zwischenstufe eine Auswertung (Akkumulation der Teilskalarprodukte, logische Verknüpfung der Teil-Iterationsabbruchindikatoren) vorgenommen werden muß. Wie aus der Abb.3 zu erkennen ist, beträgt der zeitliche Aufwand für einen entsprechenden Kommunikationszyklus statt $2(n-1)$ Einzelkommunikationszeiten (bei der sequentiellen Struktur) nun $2\sqrt{n}$ Einzelkommunikationszeiten. Besonders bei einer großen Knotenanzahl sowie der Möglichkeit einer weitgehend unabhängigen Kommunikation zwischen mehreren verschiedenen Knoten läßt sich so die für einen kompletten Slaves-Master-Slaves-Kommunikationszyklus benötigte Zeit erheblich verringern.

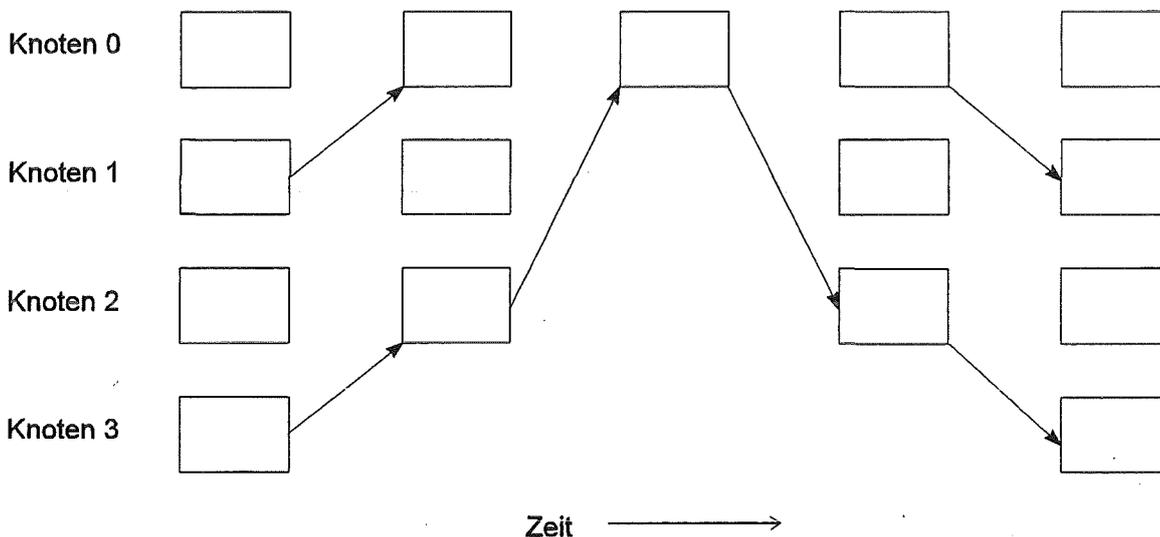


Abb.3: Schema der baumartigen Kommunikationsstruktur

Bibliotheken der TU Chemnitz

Im Rahmen der Arbeit wurden zwei Bibliotheken der TU Chemnitz verwendet. Es handelt sich dabei um jeweils eine Bibliothek mit mathematischen sowie um eine mit Kommunikationsroutinen.

Die zur Verfügung gestellten mathematischen Funktionen erwiesen sich durch ihre spezielle Implementation (BLAS1-Routinen) einer "normalen" Notation in FORTRAN überlegen, so daß sie für entsprechende Berechnungen durchgängig eingesetzt wurden. Lediglich das im Zusammenhang mit der kompakten Speicherform der A-Matrix (ausschließliche Abspeicherung der Nicht-Null-Diagonalen) auftretende modifizierte Matrix-Vektor-Produkt mußte "ausformuliert" werden.

Bei den Kommunikationsroutinen beschränkte sich die Nutzung im wesentlichen auf die Funktionen zur baumartigen Kommunikation bei Slaves-Master-Slaves-Zyklen. Bei entsprechenden Vergleichen mit der selbst implementierten Variante zur baumartigen Kommunikation schnitt diese geringfügig besser ab als die Bibliotheksfunktion.

3. Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Als Testmodell diente eine trichterförmige Grundwasserverteilung, hervorgerufen durch einen punktförmig angesetzten Förderbrunnen in einem horizontalebene Grundwasserleiter. Die verschiedenen Abmessungen der getesteten Systeme stellen lediglich unterschiedlich feine Diskretisierungen ein und desselben Modells dar.

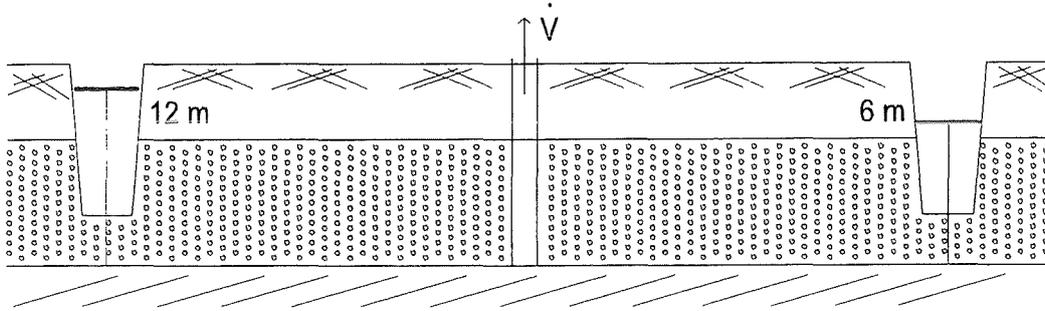


Abb.4: Testmodell

Meßwerte

In der Zeitmessung wurde neben der reinen CPU-Zeit auch die Werte für die I/O-Arbeit im Zusammenhang mit der Erstellung der hierarchischen Basis ermittelt. Die etwas willkürlich erscheinenden getesteten Systemgrößen kommen durch die hierarchische Vorkonditionierung zustande. Dazu muß bemerkt werden, daß die für die Erstellung notwendige bzw. naheliegende Rekursion durch den PARIX-Fortran-Compiler nicht unterstützt wird und somit ein Umweg zur Bereitstellung der hierarchischen Basis nötig ist. Dieser sieht so aus, daß die Basis auf einem anderen System kreierte werden muß, über eine Datei in das PARIX-System eingelesen und anschließend auf die Prozessoren verteilt wird. Bei der Möglichkeit einer Rekursion in PARIX-FORTRAN würde diese "künstliche" Verlängerung der Programmabarbeitungszeit sofort entfallen. Da eine Anwendung des Algorithmus im Rahmen der Modellierung/Simulation fast immer auf die mehrmalige Berechnung eines zu simulierenden Systems hinausläuft, erschien es legitim, den in diesem Fall lediglich einmal auftretenden Zeitanteil zur Erstellung der hierarchischen Basis für die Bewertungsgrößen zu vernachlässigen.

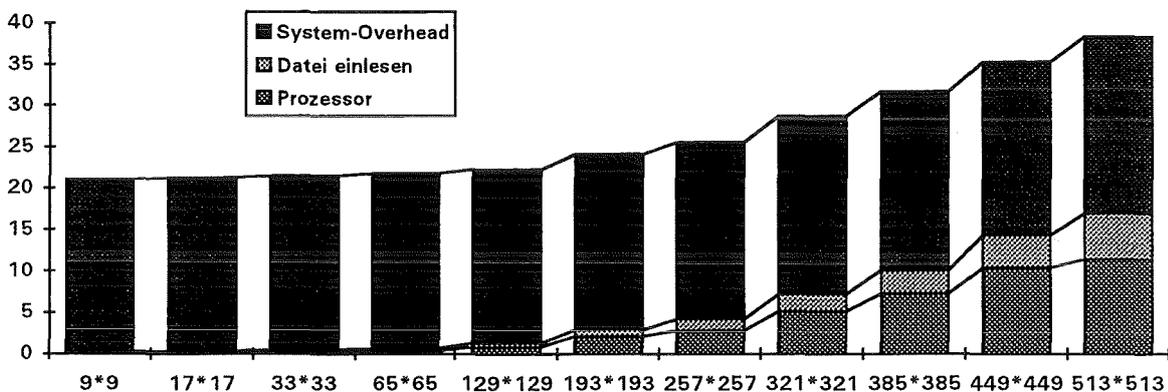


Abb.5: Lösungszeitanteile [s] für cg-Verfahren mit hierarchischer Vorkonditionierung auf 16 Knoten

Bewertung

Die Iterationszahlen (Abb.6) zeigen den positiven Einfluß der Vorkonditionierungen auf das Konvergenzverhalten. Während sich bei der Variante ohne Vorkonditionierung die Iterationszahl bei einer Problemvervierfachung annähernd verdoppelt, fällt der Anstieg mit den Vorkonditionierern deutlich geringer aus. Bei der hierarchischen Vorkonditionierung liegt außerdem die Vermutung optimaler Gittergröße von $2^n + 1$ ($n=0,1,2,\dots$) nahe, so daß die Iterationszahl bei zunehmender Gittergröße nicht automatisch zunimmt.

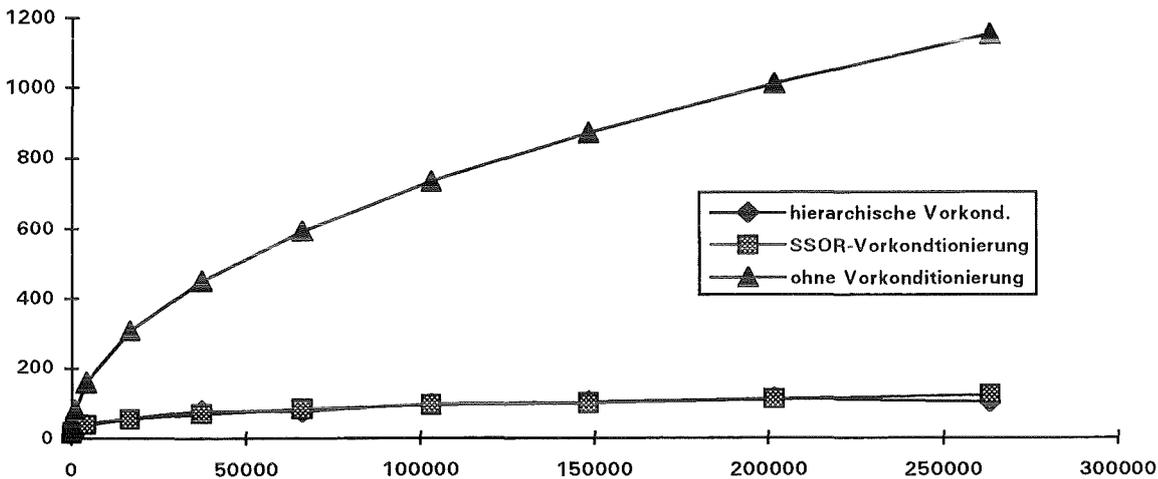


Abb.6: Anzahl der benötigten Iterationen für cg-Verfahren in Abhängigkeit von der Anzahl der Unbekannten des Gleichungssystems

Der Vergleich der CPU-Zeiten (Abb.7) für die verschiedenen Varianten der Vorkonditionierungen zeigt deutlich die o.a. Nachteile der SSOR-Vorkonditionierung. Durch den Verlust bei der Kommunikationsarbeit geht der Konvergenzvorteil mit SSOR-Vorkonditionierung verloren, so daß sogar die Variante ohne Vorkonditionierung bei 4 bzw. 16 Knoten deutlich schneller ist.

cg-Verfahren auf Knoten Systemgröße	ohne Vorkond.			mit SSOR-Vorkond.			mit hierar. Vorkond.		
	1	4	16	1	4	16	1	4	16
65*65	1,6	1,3	4,1	0,7	2,6	3,8	0,5	0,3	0,3
129*129	11,5	5,9	13,4	3,7	14,1	18,2	2,1	1,0	0,6
257*257	87,8	32,6	48,9	22,1	84,3	102,4	19,3	6,1	2,8
385*385	290,5	96,2	110,0	60,0	223,1	270,0	65,4	18,3	7,3
513*513	681,6	213,6	200,2	130,6	480,4	576,3	119,3	32,2	11,4

Abb.7: CPU-Zeiten für cg-Verfahren mit Vorkonditionierungen auf unterschiedl. Knotenanzahl für verschiedene Gleichungssystemgrößen

Aus dem Diagramm zur Effizienz (Abb.8) läßt sich deutlich ablesen, daß mit zunehmender Problemgröße das Verhältnis von paralleler zu sequentieller bzw. Kommunikationsarbeit günstiger hinsichtlich des parallelen Anteils wird. Da sich bei 4 Prozessoren auf Grund der relativ wenigen, großen Teilgebiete der parallele Anteil schneller erhöht, nähert sich die Effizienz bei 4 Prozessoren bereits bei kleineren Systemgrößen ihrem asymptotischen Grenzwert als bei 16 Prozessoren. Ausgehend vom

Graphen der Effizienz dürfte der konkrete Grenzwert für 4 Prozessoren um 0,95 und für 16 Prozessoren um 0,7 liegen. Für die größte hier getestete Systemgröße ergibt sich, als Produkt von Effizienz und Prozessoranzahl, ein Geschwindigkeitsgewinn von 3,6 bei 4 Prozessoren und von 11 bei 16 Prozessoren.

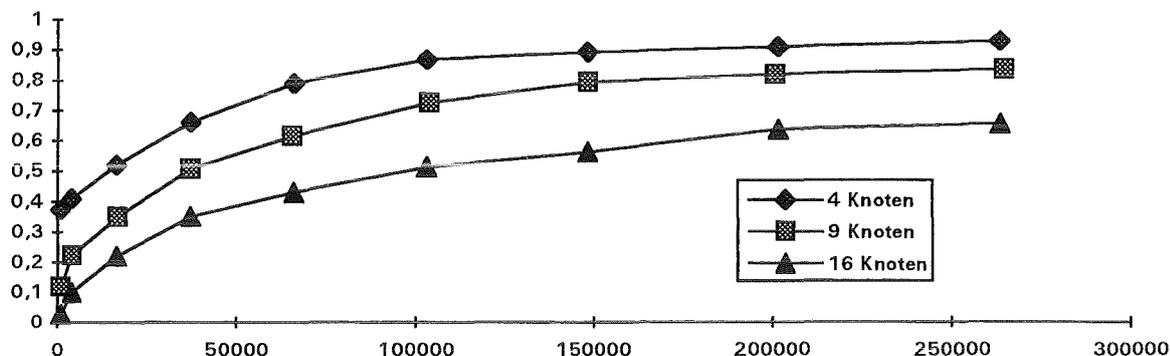


Abb.8: Effizienz für cg-Verfahren mit hierarch. Vorkond. bei 4, 9 bzw. 16 Knoten in Abhängigkeit von der Anzahl der Unbekannten des Gleichungssystems

Der relative starke Abfall bei 16 Knoten ist vor allem durch den steigenden Kommunikationsaufwand verursacht. Angesichts der im Vergleich zu ihrer Größe relativ vielen auszutauschenden Datenpakete kommt einer geringen start-up-Zeit bei der Kommunikation besondere Bedeutung zu.

Hinsichtlich der beiden vorgestellten Kommunikationsstrukturen ergaben sich geringe Vorteile für die baumartige Struktur.

Abb.9 zeigt einen Vergleich bei der Abarbeitung des cg-Algorithmus mit hierarchischer Vorkonditionierung auf verschiedenen Einprozessorsystemen sowie dem GC/Power-Plus-128 der TU Chemnitz

Systemgröße	Parallelrechner		Einzelrechner	
	Power-Xplorer (16 Knoten)	GC/Power Plus (16 Knoten)	RS 6000/550	DEC 3000 AXP 800
65*65	0,3	0,2	0,4	0,2
129*129	0,6	0,5	2,0	1,5
257*257	2,8	2,1	11,0	8,0
385*385	7,3	5,5	34,1	26,1
513*513	11,4	8,5	55,2	41,1

Abb.9: CPU-Zeit [s] auf verschiedenen Hardwareplattformen für cg-Verfahren mit hierarchischer Vorkonditionierung

Ein weiteres Ergebnis ist der positive Einfluß hinsichtlich der Kommunikationszeiten bei der Anwendung virtueller Topologien im Vergleich mit der direkten Knoten-zu-Knoten-Kommunikation. Außerdem ersparen die Topologien dem Programmierer die ständige Abbildung der logischen auf die physische Knotenstruktur.

Als Schlußfolgerung aus den Ergebnissen läßt sich ableiten, daß der Einsatz des cg-Verfahrens mit hierarchischer Vorkonditionierung aus Sicht der Parallelverarbeitung sinnvoll ist. Eine weitere Verbesserung des Iterationsverhaltens besonders bei einer großen

Anzahl an Prozessoren wird durch eine Grobgitterlösung im Zuge der hierarchischen Vorkonditionierung erzielt.

Wie allerdings aus dem Studium von Literaturquellen hervorgeht, nimmt die Konditionszahl der hierarchischen Vorkonditionierung beim 3-dimensionalen Fall den deutlich ungünstigeren Wert von $O(1/h)$ (h -Netzschrittweite) an. Statt der hierarchischen Vorkonditionierung wird dann der Einsatz des sogenannten BPX (Bramble-Pasciak-Xu)-Vorkonditionierers /1/ empfohlen.

Auf Grund von Problemen bei der Anwendung konnte die asynchrone Kommunikation nicht getestet werden. Bei konsequenter Ausnutzung der speziellen Gegebenheiten wäre dann eine weitere Beschleunigung der Kommunikation zu erwarten.

Literatur:

- /1/ Bramble, J.H.; Pasciak, J.E.; Xu, J.: Parallel multilevel preconditioners
Math. Comp., 1990
- /2/ Gräber, P.-W.: The use of vector computers and transputer networks in the simulation migration processes in the soil and groundwater zone.
Reihe NNFM, Bd. 38, 93 - 100, Vieweg, Braunschweig, 1993
- /3/ Hackbusch, W.: Iterative Lösung großer schwachbesetzter Gleichungssysteme.
Teubner Studienbücher Mathematik, B. G. Teubner, Stuttgart, 1991
- /4/ Hackbusch, W.: Multi-grid Methods and Applications.
Springer, New York, 1985
- /5/ Law, K.H.: A parallel finite element solution method.
Computer and Structures, 845 -858, 23(6)/1989
- /6/ Meyer, A.; Haase, G.; Langer, U.: Parallelisierung und Vorkonditionierung des CG-Verfahrens durch Gebietszerlegung
Proceedings GAMM-Seminar über Transputersysteme, Heidelberg, 1991
- /7/ Yserentant, H.: Hierarchical bases give conjugate gradient methods a multigrid speed of convergence
Applied Mathematics Comp., 347 - 358, 19/1986

5.Arbeitstreffen des Arbeitskreises 5 der Fachgruppe 4.6.1 Werkzeuge und Modellbildung in Umweltanwendungen, 02.03.-03.03.1995 in Braunschweig

Diskussionsbeitrag:

Erweiterung des Wissenseditors des Expertensystems EXCEPT durch unscharfe Modellierung

K. Christoph Ranze

Arbeitsgruppe Künstliche Intelligenz,
Fachbereich Informatik und Mathematik,
Universität Bremen, Germany
kcr@informatik.uni-bremen.de

Evelina Ninova

Arbeitsbereich Städtebau III/Stadtökologie
Forschungsschwerpunkt Stadt, Umwelt und Technik
Technische Universität Hamburg-Harburg

1. März 1995

Zusammenfassung

EXCEPT ist ein Expertensystem zur Unterstützung von Bewertungsanliegen. Das notwendige Expertenwissen wird über ein Bewertungsmodell in einer Wissensbasis formalisiert. Um einzelne Indikatoren über verschiedene Abstraktionsebenen zu einem übergeordneten Bewertungsanliegen zu aggregieren, stehen eine Reihe unterschiedlicher Methoden zur Verfügung. Diese Bewertungs- und Aggregationsmethoden sollen in diesem Beitrag vorgestellt werden. Anschließend wird ein Ansatz diskutiert, der die Aggregation mit Hilfe unscharfer Modellierung erlaubt.

1 Das Expertensystem EXCEPT

EXCEPT ist ein Expertensystem zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen in (nahezu) beliebigen Domänen. Bisher wurde **EXCEPT** vornehmlich im Umweltbereich eingesetzt. Beispielhaft dafür ist die Verwendung des Systems im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) von alternativen Architektenentwürfen im Rahmen der Bauleitplanung zur EXPO2000 in Hannover (siehe [1] und [2]).

Das **EXCEPT** -System besteht im wesentlichen aus zwei Komponenten:

1. Die Wissensakquisitionskomponente:
Bewertungswissen der Fachexperten wird strukturiert und in Form von Bewertungsmodellen in Wissensbasen formalisiert.
2. Die Bewertungskomponente:
Konkrete Bewertungen zu Bewertungsgegenständen eines Projektes werden durchgeführt und benutzerspezifisch dokumentiert.

In diesem Beitrag sollen die bisher vorhandenen Modellierungsmöglichkeiten von Expertenwissen innerhalb der Akquisitionskomponente dargestellt werden und anschließend die Verwendung unscharfer Modellierung vorgestellt und diskutiert werden.

2 Die Modellierung von Wissen in EXCEPT

Das zur Definition eines Bewertungsmodells benötigte Expertenwissen wird in einer Methodenwissensbasis zusammengefaßt. Die konzeptionelle Strukturierung des Bewertungsmodells erfolgt in unterschiedlichen Arbeitsschritten, wobei ausgehend von der Definition des Bewertungsanliegens ein Entscheidungsbaum modelliert wird, dessen Knoten untergeordnete Teilbewertungsanliegen als Verfeinerung des Hauptanliegens darstellen. In den Blättern befinden sich Indikatoren (Sachaussagen), die während einer konkreten Bewertung die beobachtbaren Zustände der Problem- domäne aufnehmen (siehe Abb. 1).

Bei der Erstellung einer Wissensbasis kann man folgende Arbeitsschritte unterscheiden:

Schritt 1: Definition des (Haupt-)Bewertungsanliegens¹ (Anliegen 1.Ordnung)

Schritt 2: Definition der Unterbewertungsanliegen (Anliegen 2. bis n-ter Ordnung)

Schritt 3: Definition der Indikatoren, Klassifikation der möglichen Indikatorwerte, Festlegung der Indikatorbewertungsmodule

¹In der Entscheidungstheorie wird hier der Begriff des 'Kriteriums' verwandt

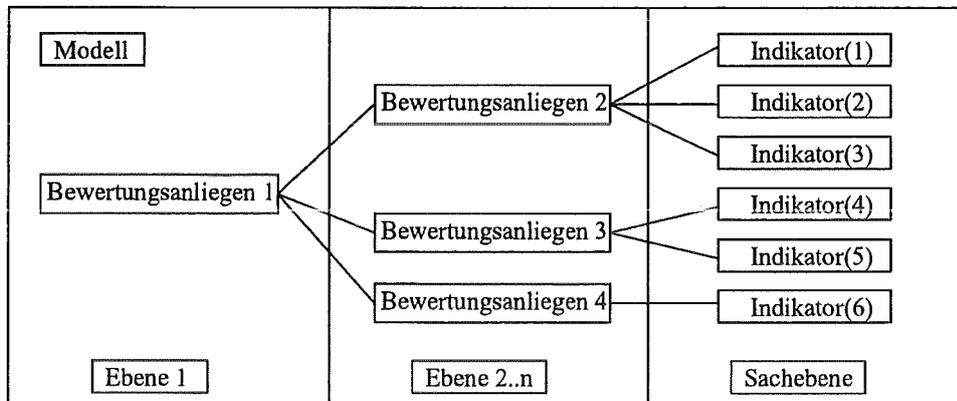


Abbildung 1: Strukturierung eines Bewertungsmodells

Schritt 4: Verknüpfung der 'Blätter' und 'Knoten' durch Festlegung von Aggregationsvorschriften

Die Formalisierung eines in dieser Form definierten Bewertungsmodells erfolgt über die Wissensakquisitionskomponente in einer intuitiven und leicht zu erlernenden Syntax.

Grundsätzlich werden in **EXCEPT** zwei Arten von Bewertungsmethoden unterschieden:

- Indikatorbewertungsmethoden
 - Tabellen-Indikatorbewertungsmodule
 - Skalen-Indikatorbewertungsmodule
 - Transformations-Indikatorbewertungsmodule
- Aggregationsmethoden
 - logische Aggregationsmodule
 - arithmetische Aggregationsmodule

Durch Indikatorbewertungsmethoden werden die möglichen Sachaussagen der Indikatorwertmengen in entsprechende Wertstufenmengen transformiert. Die Aggregationsmethoden hingegen bilden einen n-dimensionalen Raum von Wertaussagen auf eine eindimensionale Wertstufenmenge höheren Abstraktionsgrades ab. Durch diese Aggregationsmethoden werden Teilbewertungsanliegen zu komplexeren Bewertungen zusammengefasst.

2.1 Skalenbewertung

Ein Skalen-Indikatorbewertungsmodul entspricht im mathematischen Sinne einer Funktion \mathcal{F} mit reellem Definitionsbereich \mathcal{D} und diskretem Wertebereich \mathcal{W} .

$$\mathcal{F} :: \mathcal{D} \longrightarrow \mathcal{W}$$

Eine solche Funktion kann interpretiert werden als die Abbildung einer z.B. als Meßwert gegebenen quantitativen Sachaussage auf eine qualitative Wertaussage. Ein Beispiel für ein Skalen-Indikatorbewertungsmodul zeigt Abb.2.

Indikator: Bakteriengehalt des Meerwassers Bewertungsanliegen: Qualität des Meerwassers	
Indikatorwertintervalle [n/dm ³]	Wertstufen [Gehalt 5]
$0 \leq X < 1.000$	sehr gering
$1.000 \leq X < 5.000$	gering
$5.000 \leq X < 15.000$	mittel
$15.000 \leq X < 50.000$	hoch
$50.000 \leq X$	sehr hoch

Abbildung 2: Beispiel für ein Skalen-Indikatorbewertungsmodul

Die Skalenbewertung beschreibt letztendlich nichts weiter als eine Treppenfunktion, in der durch Fallunterscheidung Indikatorwertintervalle zu Wertstufen zugeordnet werden (siehe Abb.3).

Die Schwäche dieser Art von Abbildung liegt darin, daß innerhalb eines Wertintervalls keine graduellen (Qualitäts-) Unterscheidungen auf der Seite der Wertstufen möglich sind.

Tabellen- und Transformations-Indikatorbewertungsmodule werden hier nicht näher beschrieben. Durch sie können einerseits Abbildungen von qualitativen Sachaussagen auf Wertaussagen und andererseits einfache arithmetische Transformationen modelliert werden.

2.2 Arithmetische Aggregation

Eine arithmetische Aggregation stellt eine mathematische Funktion \mathcal{F} dar, die n reellwertige Wertstufenmengen \mathcal{D}_i in einen reellen Wertebereich \mathcal{W} abbildet.

$$\mathcal{F} :: \mathcal{P}(\mathcal{D}_1, \dots, \mathcal{D}_n) \longrightarrow \mathcal{W},$$

mit $\mathcal{P} \in \{+, -, *, /, \min, \max\}$

Durch geeignete Kombination arithmetischer Aggregationsmodule lassen sich auch komplexe Bewertungs- und Gewichtungsfunktionen modellieren.

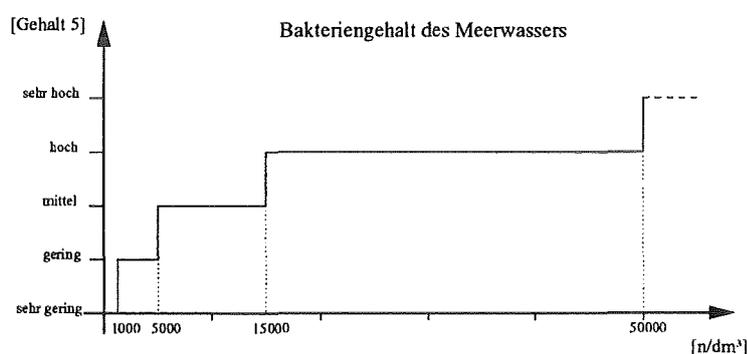


Abbildung 3: Graphische Darstellung eines Skalen-Indikatorbewertungsmoduls

2.3 Logische Aggregation

Eine logische Aggregation von n qualitativen Wertaussagen \mathcal{D}_i der Wertstufenmengen \mathcal{D}_i zu einer neuen Wertaussage \mathcal{W} der Wertstufenmenge \mathcal{W} kann als eine Relation aufgefaßt werden:

$$\mathcal{R} :: \mathcal{D}_1 \{ \times \mathcal{D}_k \}^* \times \mathcal{W},$$

mit $k \in \{2, \dots, n\}$

Darstellbar ist diese Relation in Form einer $(n+1)$ -spaltigen Tabelle² (siehe Abb.4), in der die Wertaussagen der untergeordneten Module auf eine abstrakte Wertaussage abgebildet werden. Die Zeilen einer solchen Tabelle können als *Wenn-Dann-Regeln* interpretiert werden³.

² oft auch in Form einer n -dimensionalen Matrix

³ Diese *Wenn-Dann-Regeln* werden in der Dokumentationskomponente von **EXCEPT** genutzt, um quasi-natürlichsprachliche Erklärungen zu den Bewertungsergebnissen zu generieren.

Bewertungsanliegen: Qualität des Meerwassers		
Logische Aggregation der Module:		
Modul 1: Bakteriengehalt des Meerwassers		
Modul 2: Ölgehalt des Meerwassers		
Modul 1: Bakteriengehalt	Modul 2: Ölgehalt	Qualität des Meerwassers [Qualität 5]
sehr gering	unbedenklich	sehr gut
gering	unbedenklich	gut
mittel	unbedenklich	ausreichend
hoch	unbedenklich	schlecht
sehr hoch	*	nicht akzeptabel
*	sehr bedenklich	nicht akzeptabel

Abbildung 4: Beispiel für ein logisches Aggregationsmodul

Der Nachteil dieser Methode ist wiederum leicht ersichtlich. Schon bei einer geringen Anzahl n zu aggregierender Module wird die Bewertungsmatrix und damit die Anzahl der Regeln so komplex, daß das Aggregationsmodul insgesamt nicht mehr zu überschauen ist. Die Ursache liegt in der tabellenförmigen Darstellung der Regeln, in der nur UND-Verknüpfungen einzelner Werte möglich sind.

3 Modellreduktion durch unscharfe Modellierung

Eine Erweiterung des Verarbeitungsmodells von **EXCEPT** soll die beschriebenen Schwächen des Skalen-Indikatorbewertungsmoduls und des logischen Aggregationsmoduls beseitigen. Ein erster Ansatz, der hier kurz vorgestellt werden soll, untersucht die Verwendbarkeit der Fuzzy Set-Theorie zur unscharfen Modellierung.

In einer ersten Phase wird die dem **EXCEPT**-System zugrunde liegende **PROLOG**-Inferenzmaschine um ein fuzzy-logische Komponente erweitert. Erste Versuche in einer Testumgebung zeigten, daß durch eine solche Erweiterung des Verarbeitungsmechanismus die bisher vorhandene Funktionalität des Systems subsumiert wird.

In einer zweiten Phase wird die Benutzerschnittstelle der neuen Funktionalität angepaßt. Als erster Schritt werden im folgenden zwei neue Module eingeführt, die eine unscharfe Modellierung auf der Ebene der Akquisitionskomponente erlauben.

3.1 Das Fuzzy-Skalen-Indikatorbewertungsmodul

Ausgehend von dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen Modul wird eine neue Methode zur Modellierung eines numerischen Indikators eingeführt. Anstatt über eine Treppenfunktion werden die Wertaussagen zu einem Indikator nun über eine Zugehörigkeitsfunktion im Sinne der Fuzzy Set-Theorie ermittelt (siehe Abb. 5).

Eine Wertstufenmenge wird jetzt als linguistische Variable interpretiert und besteht aus einer Anzahl von Fuzzytermen mit entsprechender Zugehörigkeitsfunktion (auf einer definierten Domäne)⁴. Über den funktionalen Zusammenhang wird im Aggregationsmodul die Zugehörigkeit einer Sachaussage zu einer Wertaussage festgelegt.

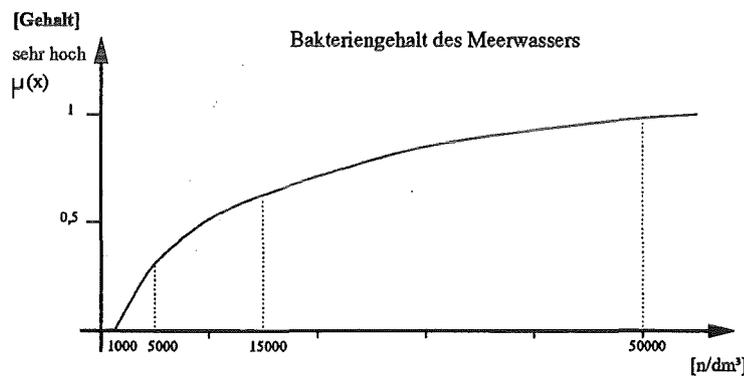


Abbildung 5: Graphische Darstellung eines Fuzzy-Skalen-Indikatorbewertungsmoduls

3.2 Das fuzzy-logische Aggregationsmodul

Bei der Verwendung eines fuzzy-logischen Aggregationsmoduls werden die unscharf modellierten untergeordneten Module mit Hilfe geeigneter Operatoren zur einer abstrakteren Wertaussage aggregiert. [4] beschreibt mögliche Operatoren, die in verschiedenen Domänen empirisch untersucht wurden. Die Modellierung erfolgt nach wie vor in Form einer Regelbasis. Ziel ist es, durch die Verwendung einer geringeren Zahl von Wertstufen in den Wertstufenmengen (d.h. eine geringe Anzahl von Ausprägungen einer linguistischen Variablen) die Menge der Regeln in einem Aggregationsmodul zu verringern.

Beispielhafte Bewertungen in der Anwendung der Auswertung von Bodenkontaminationen und von Gesundheitsbeeinträchtigungen durch Luftbelastungen zeigen, daß

⁴Im Beispiel der Abb. 5 besteht die Wertstufenmenge aus nur einem Fuzzyterm "sehr hoch".

der fuzzy-logische *max*-Operator für die untersuchten vorsorge-orientierten Aggregationen geeignet erscheint. Abb.6 zeigt die Umsetzung des Ansatzes auf die einfache Beispieldomäne.

Bewertungsanliegen: Qualität des Meerwassers		
Logische Aggregation der Module:		
Modul 1: Bakteriengehalt des Meerwassers		
Modul 2: Ölgehalt des Meerwassers		
Modul 1: Bakteriengehalt (sehr hoch)	Modul 2: Ölgehalt (sehr bedenklich)	Qualität des Meerwassers (sehr gut)
$\mu(x)$	$\mu(y)$	$\max(\mu(x), \mu(y))$

Abbildung 6: Fuzzy-Logisches Aggregationsmodul (vorsorge-orientiert)

4 Erste Ergebnisse und Ausblick

Der Einsatz von unscharfer Modellierung in der Beschreibung der Indikatorwerte, entsprechender Indikatorbewertungsmethoden und von Fuzzy-Aggregationsmethoden wurde beispielhaft in der Bewertung von Bodenkontaminationen untersucht. Dabei können bisher folgende erste Ergebnisse zusammengefaßt werden:

- Die Modellierung von Indikatorwerten in Skalen-Indikatorbewertungsmodulen erfolgt nicht mehr nur in Intervallen. Durch die Einführung von Fuzzy-Modell-elementen können funktionale Zugehörigkeiten modelliert werden. Die Zwischenbereiche ordinaler Wertstufen können durch Zugehörigkeitsfunktionen präzisiert werden. Dies entspricht einer adäquateren Modellierung des Expertenwissens.
- Die Aggregationsregeln in den Methodenwissensbasen können erheblich reduziert werden. Neben reinen UND-Verknüpfungen im Bedingungsteil von Regeln sollen zukünftig auch UND/ODER-Verknüpfungen möglich sein.
- Die Unschärfe, die in den Sachaussagen modelliert wird, kann in Form eines 'Bestätigungsgrades' als transparente Hintergrundinformation über die Aggregationsstufen bis zum Endergebnis weitergetragen werden. Dadurch kann der subjektive Anteil des Bewertungsvorganges abgebildet werden.

Neben den bisher erzielten Ergebnissen stehen noch Untersuchungen zu folgenden wichtigen Fragen offen:

- Der theoretische Aspekt der Korrektheit:
Kann gewährleistet werden, daß durch die unscharfe Modellierung in jedem Fall korrekte und vollständige Ergebnisse berechnet werden?
Dürfen aus der Sicht der Theorie der Fuzzy-Logik in jedem Fall unterschiedliche Wertstufenmengen miteinander verrechnet werden?
- Der Aspekt der Benutzerfreundlichkeit:
 - Welche zusätzlichen Eingaben muß der Fachexperte bei der Modellierung der Wissensbasen machen? Welche Eingaben sind ihm überhaupt zuzumuten?
 - In welchem Maß muß das vorhandene Verarbeitungsmodell von EXCEPT erweitert werden? (Grundsätzlich ist durch die unterliegende Prolog-Inferenzmaschine eine Verarbeitung plausibler Schlüsse möglich.)
 - Wie kann gewährleistet werden, daß die erzeugten Dokumentationen für den Anwender auf Sachbearbeiterebene transparent bleiben?

Literatur

- [1] K.v.Luck, J.Pietsch: *Das EXCEPT-Projekt: Ein Erfahrungsbericht über die Erstellung eines Expertensystems zur Unterstützung von Umweltbewertungen*, KI: Künstliche Intelligenz, 7.Jhrg, No.1, Baden-Baden 1993
- [2] M.Hübner, K.v.Luck, J.Pietsch, U.Weiland: *Das EXCEPT-Projekt: Ergebnisübersicht*, IWBS Report 238, IBM Deutschland GmbH, Dezember 1992
- [3] U.Weiland, J.Schwarz, M.Hübner: *Support of Valuation Processes in EIA's - the main task of EXCEPT*, in *Proceedings of the International Congress of Environmental Impact Assessment*, Genua, Mai 1991
- [4] H.Rommelfanger: *Fuzzy Decision Support-Systeme, Entscheidungen bei Unschärfe*, Springer Verlag, Berlin 1994

Possibilistic Graphical Models *

Jörg Gebhardt and Rudolf Kruse

Department of Mathematics and Computer Science
University of Braunschweig
D-38106 Braunschweig, Germany
Email: gebhardt@ibr.cs.tu-bs.de

Abstract

Graphical modelling is a powerful framework for reasoning under uncertainty. We give an introduction to the semantical background and relevant properties of possibilistic networks. We consider knowledge representation and independence as well as evidence propagation and learning such networks from data. Furthermore, we outline the perspectives of possibilistic networks as a tool for the efficient information-compressed treatment of uncertain *and* imprecise knowledge.

1 Introduction

Due to its simplification of multivariate data analysis, graphical modelling is being increasingly recognized as an appropriate framework for both knowledge representation and inference under uncertainty [44]. Applications can be found in all areas of analysing dependent observations, for example, in regression analysis, spatial analysis, and expert systems. As a consequence of its primary origin in multivariate statistics, the most advanced numerical approaches to the structured handling of uncertain information have been obtained in the field of probabilistic graphical models [1].

Referred to uncertain reasoning in knowledge-based systems, *Bayesian networks* are established as a powerful tool [26]. They provide a well-founded normative framework in the presence of *uncertain*, but *precise* data. On the other hand, extending pure probabilistic settings to the treatment of *imprecise (multivalued)* information usually restricts the computational tractability of inference mechanisms. Since the explicit modelling of imprecise data is more and more claimed as being necessary for industrial practice, it is reasonable to investigate graphical models related to alternative uncertainty calculi. Under the aspect of efficiency, such uncertainty calculi should provide a justified form of *information compression* and *simplification* in order to support reasoning under uncertainty and imprecision without essentially affecting the expressive power and correctness of decision making procedures.

Possibility theory [8] seems to be very promising for this purpose. It is a good choice for systems that accept *approximate* instead of crisp reasoning, characterized by a non-significant sensitivity concerning slight changes of information. From this it follows that

*This work has partially been funded by CEC-ESPRIT III Basic Research Project 6156 (DRUMS II)

possibility theory may grow up to play the same role in the field of uncertain reasoning in knowledge-based systems as nowadays *fuzzy control* as a tool for (information-compressed) interpolation between crisp points in vague environments in the field of control engineering [20].

Related to the mentioned perspectives, the paper is organized as follows: Section 2 gives a brief introduction to graphical models, starting with the more familiar example of *probabilistic* graphical models. Based on the concept of a *possibility distribution* that is investigated in Section 3, we consider reasoning and learning in *possibilistic* graphical models in Section 4. Some additional remarks in Section 5 conclude the discussion.

2 Graphical Models

Graphical models provide a unified qualitative framework for representing and reasoning with uncertainty and independencies. The qualitative part of a graphical model is a graphical representation of dependencies between variables, expressed, for example, by a directed acyclic graph (DAG), an undirected graph (UG), or a chain graph (CG). Each structure reflects a certain kind of independence in the way that conditioning on evidence (obtained through instantiation of a subset of variables) can be realized by efficient local propagation algorithms, related, for example, to the vertices involved in a hyperedge of a dependency hypergraph, rather than by inefficient global conditioning procedures. For this reason, graphical models are always referred to a notion of (*conditional*) *independence* that has to be specified for the particular uncertainty calculus under consideration [2, 26].

Let V denote a finite set of variables taking their values ω_v on attached domains Ω_v , $v \in V$. Furthermore, let Ω denote their joint domain, and Ω_A the marginal domain of all variables in $A \subseteq V$. Finally, let $\omega_A = (\omega_v)_{v \in A}$ denote a possible state in Ω_A , and $\omega = (\omega_v)_{v \in V}$ a possible state in Ω .

In this paper, we refer to finite domains only, which means that we confine to the important case of *discrete graphical models* with V being the underlying set of vertices.

The most popular kind of a *probabilistic* graphical model for knowledge representation and propagation in expert systems is the *Bayesian network*, also called *belief network* [26]. A Bayesian network consists of a directed acyclic graph $G = (V, E)$, and a set of conditional probability distributions $P_v(\omega_v | \omega_{par(v)})$, $v \in V$, where $par(v) = \{v' \in V | (v', v) \in E\}$ denotes the set of all parents of v in G .

Since G is directed, Bayesian networks are appropriate to represent direct causal dependencies between variables, which in many cases is quite natural for the purpose of knowledge representation in probabilistic expert systems that support, for example, diagnostic reasoning (abductive inference) in medical applications.

Bayesian networks specify a conditional decomposition of the joint probability distribution P on Ω :

A strictly positive probability distribution P on Ω *factorizes* w.r.t. a directed acyclic graph $G = (V, E)$, if

$$P(\omega) = \prod_{v \in V} P(\omega_v | \omega_{par(v)}). \quad (1)$$

In this case, P satisfies the *global Markov property*, saying that, for any disjoint subsets A , B , and C of V , such that C separates A from B in the moral graph induced by A , B ,

and C , we have that A is conditionally independent of B given C [21].

Hence, a Bayesian network is also a graphical representation of a Markov chain. Alternatively, the Markov property can be expressed in terms of the concept of *d-separation* [42].

It can be shown that $P(\omega) = \prod_{v \in V} P_v(\omega_v | \omega_{par(v)})$ constitutes the factorizing probability distribution of a Bayesian network, where $P(\omega_v | \omega_{par(v)}) = P_v(\omega_v | \omega_{par(v)})$, whenever $P_v(\omega_{par(v)}) > 0$. For this reason, equation (1) can be seen as the *interpretation* of a Bayesian network.

The global Markov property of Bayesian networks supports the development of efficient local propagation algorithms for calculating the one-dimensional marginals of the conditioned probability distribution P , given an instantiation of a subset of the variables in V [25, 22, 30].

In analogy to a probabilistic graphical model, a *possibilistic* graphical model consists of a qualitative part, which is, for instance, a DAG, UG, or CG, respectively, and a quantitative part, namely a family of (conditional) *possibility* distributions instead of probability distributions.

In the following section, we will investigate the concept of a possibility distribution in more detail.

3 Possibility Distributions

A *possibility distribution* π on a universe of discourse Ω is a mapping from Ω into the unit interval, i.e. $\pi : \Omega \rightarrow [0, 1]$ [46].

From an intuitive point of view, given a possibility distribution π as an imperfect specification of a state $\omega_0 \in \Omega$, for any $\omega \in \Omega$, $\pi(\omega)$ quantifies the possibility degree of truth of $\omega = \omega_0$. The case $\pi(\omega) = 0$ means that $\omega = \omega_0$ is impossible, $\pi(\omega) = 1$ means that $\omega = \omega_0$ is possible without any restrictions, and $\pi(\omega) \in (0, 1)$ means that $\omega = \omega_0$ is partly possible, since there is evidence that supports $\omega = \omega_0$ as well as evidence that contradicts $\omega = \omega_0$.

A possibility distribution π induces a partial ordering on the possible states, which is less informative than a probability distribution on Ω , so that the *measure of possibility* $\Pi(A)$ of a finite event $A \subseteq \Omega$ is simply defined as the maximum of $\pi(\omega)$ for all $\omega \in A$.

Recent years of research provided different proposals for the semantics of a *theory of possibility* as a framework for reasoning with uncertain and imprecise data. Among the numerical approaches, we like to mention possibility distributions as epistemic interpretation of fuzzy sets [46], the axiomatic view of possibility theory based on the concept of a possibility measure [8], Spohn's theory of epistemic states [39], possibility distributions as one-point coverages of random sets [24, 18], contour functions of consonant belief functions [29], falling shadows in set-valued statistics [43], and possibility theory based on likelihoods [7].

The view of a possibility distribution as an *information-compressed* representation of an uncertain and imprecise specification of a state ω_0 of interest can be clarified in a random set framework that generalizes traditional approaches given in [40, 6, 4].

Let $(C, 2^C, P)$, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, denote a finite probability space, and $\gamma : C \rightarrow 2^\Omega$ a set-valued mapping. C is interpreted as a set of contexts that are distinguished for set-valued specifications of ω_0 . The contexts are supposed to describe different physical

and observation-related frame conditions, which are, for example, formalized by logical propositions.

The relation $\gamma(c_j)$ is assumed to be the *most specific correct set-valued specification* of ω_0 , implied by the frame conditions that describe c_j . This says that $\omega_0 \in \gamma(c)$ is guaranteed to be true for $\gamma(c)$, but for no proper subset of $\gamma(c)$. The quantity $P(\{c_j\})$ is the (subjective) probability of applying c_j for the specification of ω_0 . The resulting *random set* $\Gamma = (\gamma, P)$ is an imperfect (set-valued and uncertain) specification of ω_0 . Let π_Γ denote the *one-point coverage* of Γ (the *possibility distribution induced by Γ*), defined as

$$\pi_\Gamma : \Omega \rightarrow [0, 1], \pi_\Gamma(\omega) = P(\{c \in C \mid \omega \in \gamma(c)\}).$$

In a complete modelling, the contexts in C must be specified in detail, so that the relationships among all contexts c_j and their context-dependent specifications $\gamma(c_j)$ of ω_0 are clarified. On the other hand, if the contexts are unknown or ignored, then $\pi_\Gamma(\omega)$ is the total mass of all contexts c that provide a correct specification $\gamma(c)$ of ω_0 , and this quantifies the *possibility of truth* of “ $\omega = \omega_0$ ” [13, 12].

The (information-compressed) imperfect knowledge about ω_0 , represented by π_Γ , can be specialized in the way that uncertainty is excluded by stating α -*correctness* of Γ w.r.t. ω_0 , which means that there exists a subset $C' \subseteq C$ of contexts such that $P(C') \geq \alpha$ and $\forall c' \in C' : \omega_0 \in \gamma(c')$. In this case, the α -*cut* $[\pi_\Gamma]_\alpha = \{\omega \mid \pi_\Gamma(\omega) \geq \alpha\}$ of the possibility distribution π_Γ turns out to be the most specific correct set-valued specification of ω_0 , given the representation Γ of our background knowledge about ω_0 , and the α -correctness assumption w.r.t. ω_0 [14].

Operating on possibility distributions can be performed within the pure random set background [4, 18], but has the disadvantage that it is not conform with the *extension principle* [45], which from a semantical point of view has been claimed as the adequate way of generalizing operations from crisp or imprecise (set-valued) data to the possibilistic setting [9, 20]. For this reason, it seems to be more convenient to base the interpretation of possibility degrees on the above mentioned concepts of α -correctness and maximum specificity, strongly oriented at the meaning of the underlying contexts in C . For an extensive presentation of this view of possibility theory, we refer to [14, 16]. It verifies the extension principle not just as a principle, but as a theorem in the underlying formal and semantical framework. Special aspects of possibility measures for decision making have been considered in [15].

4 Possibilistic Networks

Possibilistic graphical models can be introduced in a similar way as probabilistic graphical models. The main difference consists in the change from probability distributions to possibility distributions, so that there is the need for an appropriate concept of *possibilistic independence*.

Although well-known for a couple of years [19], a unique concept of possibilistic independence has not been fixed yet. For some recent discussions, see [10, 11]. In our opinion, the main problem is to recognize that possibility theory is a calculus for uncertain *and* imprecise reasoning.

For comparison, note that using a single *probability distribution* covers only modelling

of *uncertain*, but *precise* data. In a corresponding way, relational database theory applies *relations* in order to represent *imprecise*, but *certain* information about dependencies among variables. Due to their restrictions to distinguishable kinds of imperfect data, the two frameworks supply different concepts of independence, which are probabilistic independence and lossless-join decomposability. Probabilistic independence may be viewed as an *uncertainty-driven* type of independence, whereas lossless-join decomposability [23, 41] reflects an *imprecision-driven* type of independence.

Since possibility theory addresses both kinds of imperfect knowledge, concepts of possibilistic independence can be uncertainty-driven or imprecision-driven, so that there are at least two ways of introducing and justifying them.

Concerning the treatment of imperfect information, one should consider two levels of reasoning, namely the *credal level*, where all operations on our pieces of knowledge take place, and the *pignistic level*, where the final step of decision making follows [36]. Imprecision-driven possibilistic independence is strongly oriented at the credal level, applying the extension principle as the basic concept of operating on possibility distributions, and avoiding normalization, which would change their meaning from quantifying absolute to relative degrees of possibility.

In opposite to this, an uncertainty-driven approach to possibilistic independence should be referred to the pignistic level, taking decision making aspects into account and thus quantifying the relative degrees of possibility of events. On this level, the need of normalization is obvious.

With respect to this consideration, in [3] two definitions of possibilistic independence have been justified, namely uncertainty-driven possibilistic independence based on *Dempster's rule of conditioning* [29], specialized to possibility measures, and imprecision-driven possibilistic independence that coincides with the well-known concept of *possibilistic non-interactivity* [8], which is a generalization of the lossless-join-decomposition property to the possibilistic setting.

Due to consistency with the extension principle, we confine to possibilistic non-interactivity. As a concept of possibilistic independence it can be formalized as follows:

Let A , B , and C be three disjoint subsets of variables in V .

A is called *conditionally independent* of B given C w.r.t. π , abbr. $I_\pi(A, B|C)$, iff

$$\pi(\omega_{A \cup B} | \omega_C) = \min\{\pi(\omega_A | \omega_C), \pi(\omega_B | \omega_C)\} \quad (2)$$

whenever $\pi(\omega_C) > 0$, $\omega \in \Omega$, with $\pi(\cdot|\cdot)$ denoting the non-normalized conditional possibility distribution, i.e.

$$\pi(\omega_A | \omega_C) = \max\{\pi(\omega') | \omega' \in \Omega, \omega'_A = \omega_A, \omega'_C = \omega_C\}.$$

It has to be emphasized that both mentioned types of possibilistic independence satisfy the so-called *semi-graphoid axioms* [27] of symmetry, decomposition, weak union, and contraction, which were proposed as basic properties that any concept of conditional independence should have [2, 38, 37].

Possibilistic independence based on Dempster's rule additionally satisfies the intersection axiom and is therefore a *graphoid* [11]. But note that the intersection axiom is related to uncertainty-driven independence as used in probability theory. Hence, relational independence does not satisfy this axiom, and therefore it cannot be satisfied by possibilistic non-interactivity as its more general type of imprecision-driven independence.

Factorization of possibility distributions is similar to factorization of probability distributions by changing the product to the min-operator. This leads to the possibilistic counterpart of Bayesian networks, namely *possibilistic networks*.

4.1 Reasoning in Possibilistic Networks

The axiomatic framework of *valuation-based systems (VBS)* [31, 34] is able to represent various uncertainty calculi such as probability theory, Dempster-Shafer theory, and possibility theory. Conditional independence in VBSs has been defined in [32] and shown to satisfy the graphoid axioms in [33]. Possibilistic independence in VBSs corresponds to uncertainty-driven possibilistic independence based on Dempster's rule. Hence, using this type of possibilistic independence, a local propagation algorithm for hypertrees, developed in the setting of VBSs [35, 30], can directly be applied to possibilistic networks that have or can be transformed into this structure (note the correspondence between hypertrees, Markov trees, and join trees). The general algorithm has been implemented in the PULCINELLA system [28].

Choosing possibilistic non-interactivity as the appropriate type of possibilistic independence in order to hold consistency with the extension principle, the VBS approach has to be slightly modified, since no normalization takes place. The related local propagation algorithms for hypertree structures are considered in [20] and implemented in the tool POSSINFER [20].

4.2 Learning Possibilistic Networks from Data

Inducing the qualitative part (the structure) and the quantitative part (the conditional possibility distributions) of a possibilistic network from a database of sample cases has not been studied in much detail yet. A first result concerning this topic is presented in [16]. It refers to the semantic background of possibility distributions considered in Section 3, and defines a possibilistic interpretation of a database \mathcal{D} of complete, potentially imprecise sample cases. Based on this interpretation, the task is to find a possibilistic network that best fits \mathcal{D} relative to a class of possibilistic networks and a chosen optimality valuation. An obstacle for the corresponding structure induction methods is the fact that there are already serious complexity problems in the more special case of structure identification in relational data: If we are given a hypergraph H and a relation R , then only in cases where H is tractable (for instance, if H is a hypertree), one can (tractably) decide whether H induces a lossless join decomposition of R . On the other hand, the lossless join decomposition of a relation into a structure taken from a *class* of dependency hypergraphs turns out to be a harder problem, which is presumably intractable even in cases where each individual member of the class is tractable [5]. As a consequence, at least from the viewpoint of efficiency, *heuristics* for inducing possibilistic networks from data have to be tolerated.

In our approach, the valuation of a DAG with respect to a given database is referred to the amount of information that has to be added to the network in order to identify any possible state $\omega \in \Omega$ as the unknown state ω_0 of interest, assuming a uniform distribution on Ω . Due to the involved handling of imprecise data, the underlying information measure is *Hartley information* [17], generalized to the uncertainty calculus of possibility theory. In [16], we present the theoretical background and a Greedy search algorithm for inducing

DAG structures of possibilistic networks in $O(n^2mr)$ time without any a priori ordering of the vertices. This algorithm has successfully been applied for reconstructing a non-singly connected DAG with 22 vertices and 24 arcs, based on a generated database of 700 samples [16]. The reconstruction is perfect, except from those dependencies, where a unique directing of arcs is not possible, since not expressible in a database.

5 Concluding Remarks

In this paper, we discussed various aspects of reasoning and learning related to possibilistic graphical models. Whereas probabilistic networks deal with uncertain, but precise information, possibilistic networks – for reasons of efficiency – accept a well-founded type of information compression, reducing exact reasoning to only approximate reasoning, which has turned out to be sufficient for many purposes in practice.

Current research interest concerns the automatic construction of graphical models from expert knowledge and available databases of sample cases. In more general terms, this is a well-known problem in the field of *Machine Learning*, where several techniques of concept learning from examples have been discussed. On the other hand, the special properties of the considered network structures and uncertainty calculi restrict the applicability of general machine learning methods. For this reason, pure statistical methods of learning probability distributions and verifying probabilistic independence seem to be appropriate. In a similar way, the induction of possibilistic networks from data can be oriented at the specific properties of possibility theory.

References

- [1] P. Cheeseman and R.W. Oldford, editors. *Selecting Models from Data*, volume 89 of *Lecture Notes in Statistics*. Springer-Verlag, 1994.
- [2] A. Dawid. Conditional independence in statistical theory. *SIAM Journal on Computing*, 41:1–31, 1979.
- [3] L.M. de Campos, J. Gebhardt, and R. Kruse. Syntactic and semantic approaches to possibilistic independence. Technical report, University of Granada and University of Braunschweig, 1995.
- [4] J. Kampé de Fériet. Interpretation of membership functions of fuzzy sets in terms of plausibility and belief. In M.M. Gupta and E. Sanchez, editors, *Fuzzy Information and Decision Processes*, pages 13–98. North-Holland, 1982.
- [5] R. Dechter and J. Pearl. Structure identification in relational data. *Artificial Intelligence*, 58:237–270, 1992.
- [6] A.P. Dempster. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *Ann. Math. Stat.*, 38:325–339, 1967.
- [7] D. Dubois, S. Moral, and H. Prade. A semantics for possibility theory based on likelihoods. Annual report, CEC-ESPRIT III BRA 6156 DRUMS II, 1993.
- [8] D. Dubois and H. Prade. *Possibility Theory*. Plenum Press, New York, 1988.

- [9] D. Dubois and H. Prade. Fuzzy sets in approximate reasoning, Part 1: Inference with possibility distributions. *Fuzzy Sets and Systems*, 40:143–202, 1991.
- [10] L. Farinas del Cerro and A. Herzig. Possibility theory and independence. In *Proc. of the Fifth IPMU Conference*, pages 820–825, 1994.
- [11] P. Fonck. Conditional independence in possibility theory. In R. López de Mántaras and D. Poole, editors, *Uncertainty in Artificial Intelligence, Proc. of the Tenth Conference*, pages 221–226. Morgan and Kaufmann, 1994.
- [12] J. Gebhardt and R. Kruse. A comparative discussion of combination rules in numerical settings. Annual report, CEC-ESPRIT III BRA 6156 DRUMS II, 1993.
- [13] J. Gebhardt and R. Kruse. The context model — an integrating view of vagueness and uncertainty. *Int. Journal of Approximate Reasoning*, 9:283–314, 1993.
- [14] J. Gebhardt and R. Kruse. A new approach to semantic aspects of possibilistic reasoning. In M. Clarke, R. Kruse, and S. Moral, editors, *Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning and Uncertainty, Lecture Notes in Computer Science, 747*, pages 151–160. Springer, Berlin, 1993.
- [15] J. Gebhardt and R. Kruse. On an information compression view of possibility theory. In *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, pages 1285–1288, Orlando, 1994.
- [16] J. Gebhardt and R. Kruse. Learning possibilistic networks from data. In *Proc. 5th Int. Workshop on Artificial Intelligence and Statistics*, pages 233–244, Fort Lauderdale, 1995.
- [17] R.V.L. Hartley. Transmission of information. *The Bell Systems Technical Journal*, 7:535–563, 1928.
- [18] K. Hestir, H.T. Nguyen, and G.S. Rogers. A random set formalism for evidential reasoning. In I.R. Goodman, M.M. Gupta, H.T. Nguyen, and G.S. Rogers, editors, *Conditional Logic in Expert Systems*, pages 209–344. North-Holland, 1991.
- [19] E. Hisdal. Conditional possibilities, independence, and noninteraction. *Fuzzy Sets and Systems*, 1:283–297, 1978.
- [20] R. Kruse, J. Gebhardt, and F. Klawonn. *Foundations of Fuzzy Systems*. Wiley, Chichester, 1994. (Translation of the book: *Fuzzy Systeme*, Series: Leitfäden und Monographien der Informatik, Teubner, Stuttgart, 1993).
- [21] S. Lauritzen, A. Dawid, B. Larsen, and H.G. Leimer. Independence properties of directed markov fields. *Networks*, 20:491–505, 1990.
- [22] S.L. Lauritzen and D.J. Spiegelhalter. Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. *Journal of the Royal Stat. Soc., Series B*, 2(50):157–224, 1988.
- [23] D. Maier. *The Theory of Relational Databases*. Computer Science Press, Rockville, MD, 1983.

- [24] H.T. Nguyen. On random sets and belief functions. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 65:531–542, 1978.
- [25] J. Pearl. Fusion, propagation, and structuring in belief networks. *Artificial Intelligence*, 29:241–288, 1986.
- [26] J. Pearl. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference (2nd edition)*. Morgan Kaufmann, New York, 1992.
- [27] J. Pearl and A. Paz. Graphoids: A graph based logic for reasoning about relevance relations. In B.D. Boulay et al., editor, *Advances in Artificial Intelligence*, 2, pages 357–363. North Holland, Amsterdam, 1987.
- [28] A. Saffiotti and E. Umkehrer. PULCINELLA: A general tool for propagating uncertainty in valuation networks. In B. D'Ambrosio, P. Smets, and P.P. Bonisonne, editors, *Proc. 7th Conf. on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pages 323–331, San Mateo, 1991. Morgan Kaufmann.
- [29] G. Shafer. *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, Princeton, 1976.
- [30] G. Shafer and P.P. Shenoy. Local computation in hypertrees. Working paper 201, School of Business, University of Kansas, Lawrence, 1988.
- [31] P.P. Shenoy. A valuation-based language for expert systems. *Int. Journal of Approximate Reasoning*, 3:383–411, 1989.
- [32] P.P. Shenoy. Conditional independence in valuation-based systems. Working Paper 236, School of Business, University of Kansas, Lawrence, KS, 1991.
- [33] P.P. Shenoy. Conditional independence in uncertainty theories. In D. Dubois, M.P. Wellman, B. D'Ambrosio, and P. Smets, editors, *Uncertainty in Artificial Intelligence: Proc. of the 8th Conference*, pages 284–291, San Mateo, CA, 1992. Morgan Kaufmann.
- [34] P.P. Shenoy. Valuation-based systems: A framework for managing uncertainty in expert systems. In L.A. Zadeh and J. Kacprzyk, editors, *Fuzzy Logic for the Management of Uncertainty*, pages 83–104. Wiley, New York, NY, 1992.
- [35] P.P. Shenoy and G.R. Shafer. Axioms for probability and belief-function propagation. In R.D. Shachter, T.S. Levitt, L.N. Kanal, and J.F. Lemmer, editors, *Uncertainty in Artificial Intelligence (4)*, pages 169–198. North-Holland, Amsterdam, 1990.
- [36] P. Smets and R. Kennes. The transferable belief model. *Artificial Intelligence*, 66:191–234, 1994.
- [37] J.Q. Smith. Influence diagrams for statistical modeling. *Annals of Statistics*, 17(2):654–672, 1989.
- [38] W. Spohn. Stochastic independence, causal independence, and shieldability. *Journal of Philosophical Logic*, 9:73–99, 1980.

- [39] W. Spohn. A general non-probabilistic theory of inductive reasoning. In R.D. Shachter, T.S. Levitt, L.N. Kanal, and J.F. Lemmer, editors, *Uncertainty in Artificial Intelligence*, pages 149–158. North Holland, Amsterdam, 1990.
- [40] V. Strassen. Meßfehler und Information. *Zeitschrift Wahrscheinlichkeitstheorie und verwandte Gebiete*, 2:273–305, 1964.
- [41] J.D. Ullman. *Principles of Database and Knowledge-Base Systems*, volume 1. Computer Science Press Inc., Rockville, Maryland, 1988.
- [42] T. Verma and J. Pearl. Causal networks: Semantics and expressiveness. In R.D. Shachter, T.S. Levitt, L.N. Kanal, and J.F. Lemmer, editors, *Uncertainty in Artificial Intelligence*, pages 69–76. North Holland, Amsterdam, 1990.
- [43] P.Z. Wang. From the fuzzy statistics to the falling random subsets. In P.P. Wang, editor, *Advances in Fuzzy Sets, Possibility and Applications*, pages 81–96. Plenum Press, New York, 1983.
- [44] J. Whittaker. *Graphical Models in Applied Multivariate Statistics*. John Wiley and Sons, 1990.
- [45] L.A. Zadeh. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, 9:43–80, 1975.
- [46] L.A. Zadeh. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1:3–28, 1978.

Risikoanalyse mit Monte Carlo- und Fuzzy-Methoden am Beispiel der Nitratauswaschung unter Grünland

Dir. u. Prof. Dr.-Ing. W. Paul

Institut für Biosystemtechnik
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
E-Mail: paul@bst.fal.de

1 Risiko und Unsicherheiten in der Landwirtschaft

Der Begriff 'Risiko' entstammt der Versicherungsmathematik und ist definiert als Produkt aus der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Ereignisses multipliziert mit der Schwere der Auswirkungen. Bei ökologischen Betrachtungen ist dies oftmals das Produkt aus Konzentration und Toxizität. An der Definition erkennt man die beiden häufig betrachteten Extremfälle. Beim Überschreiten von (willkürlich gesetzten) Grenzwerten weitab von beginnender Gefährdung genügt die Beantwortung der Frage: "Wie oft kann es passieren?" Beim Zusammentreffen seltener Ereignisse mit äußerst schwerwiegenden Folgen muß man danach fragen: "Was alles kann im ungünstigsten Fall passieren?" Beide Fragestellungen verlangen eine unterschiedliche mathematische Behandlung. Da in der Landwirtschaft üblicherweise die erste Fragestellung im Vordergrund steht, reduziert sich hier eine Risikobetrachtung auf die Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten oder Möglichkeiten des Eintritts eines unerwünschten Ereignisses.

Landwirtschaftliche Produktion findet mit und in den Kompartimenten der Umwelt statt. Emissionen in die Kompartimente der Umwelt sind Folge der dabei ablaufenden natürlichen Prozesse, ohne Einträge ist keine Landwirtschaft möglich. Jedoch gilt es, die Emissionen zu minimieren. Die beste Strategie zur Begrenzung der Austräge ist die standort- (teilschlag-, pflanzenindividuell-) spezifische Führung des Bestandes mit exakt angepaßten Stoffeinträgen. Wo dies nicht möglich ist oder aber allgemeingültige Empfehlungen über Düngermengen etc. abgegeben werden müssen, reduziert sich die Frage nach den kritischen Einträgen auf die Fragen nach dem Einfluß der bei natürlichen Prozessen vorliegenden, oftmals großen Variabilitäten (Modellunsicherheiten). Da die Wahrscheinlichkeiten (Möglichkeiten), daß vorgegebene

Grenzwerte überschritten werden, bei Agrarökosystemen nur sehr aufwendig zu messen sind, bieten sich für diese Fragen Modelluntersuchungen an.

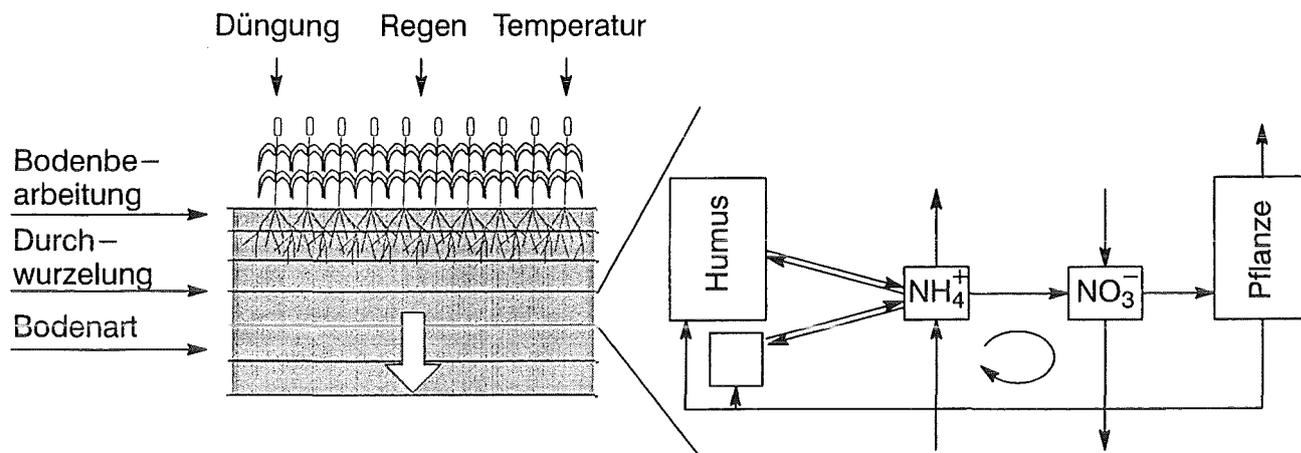
2 Parameterunsicherheiten im Grünlandmodell

Voraussetzung für eine Nitratauswaschung aus Grünland ist eine ausreichend vorhandene Nitratkonzentration im Boden sowie ein nach unten gerichteter Sickerwasserfluß. Wasserhaushalt und N-Umsetzung können weitgehend getrennt voneinander betrachtet werden.

Die Wasserbilanz berechnet sich aus der Richards-Gleichung, einer nichtlinearen partiellen Differentialgleichung, die für praktische Fälle nur numerisch lösbar ist [1]. Die Parameter für den Wasserhaushalt variieren sehr stark je nach Bodentyp, Bodenbearbeitung und Bewuchs (Durchwurzelung). Zusätzlich sind die klimatischen Größen Regen und Verdunstung regional unterschiedlich. Für die hier anstehende Fragestellung wurden mehrere Infiltrationsszenarien je nach Boden und Witterung für einen geschichteten Boden gerechnet und als unterschiedliche Szenarien für die Eingangsgrößen 'Bodenfeuchte und Wasserfluß' hinterlegt. Die hier interessierenden Hauptunterschiede zwischen unterschiedlichen Böden und Regenmengen lassen sich für die gegebene Fragestellung auf Verstärkungsparameter reduzieren.

Zur N-Umsetzung ist zu sagen, daß in jeder Bodenschicht eine mikrobiell bedingte Zyklierung von Stickstoff zwischen den verschiedenen Komponenten stattfindet. Im Boden (und besonders unter Grünland) befindet sich ein sehr großer Pool an organischen Stickstoffverbindungen, hier unterteilt in eine große stabile Fraktion ('Humus') und eine kleinere, leichter abbaubare Fraktion. Unter natürlichen Umständen findet eine 'Mineralisierung' eines Teils der organischen Fraktionen zu Ammonium statt. Ein weiterer mikrobieller Prozeß ('Nitrifizierung') sorgt in der Regel für eine schnelle Umwandlung zu Nitrat. Ohne wesentlichen Fehler kann angenommen werden, daß nur Nitrat von der Pflanze aufgenommen werden kann und nur Nitrat ausgewaschen wird. Mikroben und Pflanzenteile sterben ab und ergänzen den Humuspool ('Humifizierung'). Der Kreislauf der in jeder Bodenschicht stattfindenden Stickstoffumsetzung ist in Bild 1 dargestellt. Die Umsatzraten der Transformationsprozesse schwanken dabei in weiten Grenzen. Jedoch sind die wichtigsten Einflußfaktoren bekannt, so daß sich die Bandbreiten der mikrobiellen Umsatzraten deutlich verringern lassen (Bild 2). Die Größenordnung der Raten sowie Regeln über die Einflußparameter sind angebar.

Risikoabschätzung der N-Auswaschung



Eingangsgrößen: Infiltrations- und Management-Szenarien

Modellstruktur: N-Zyklen in den Bodenschichten

Modellparameter: stark variabel, nur in Bandbreiten bekannt

Ausgangsgrößen: NO_3^- -Konzentrationen im Sickerwasser

Bild 1: Modell der Stickstoffumsetzung

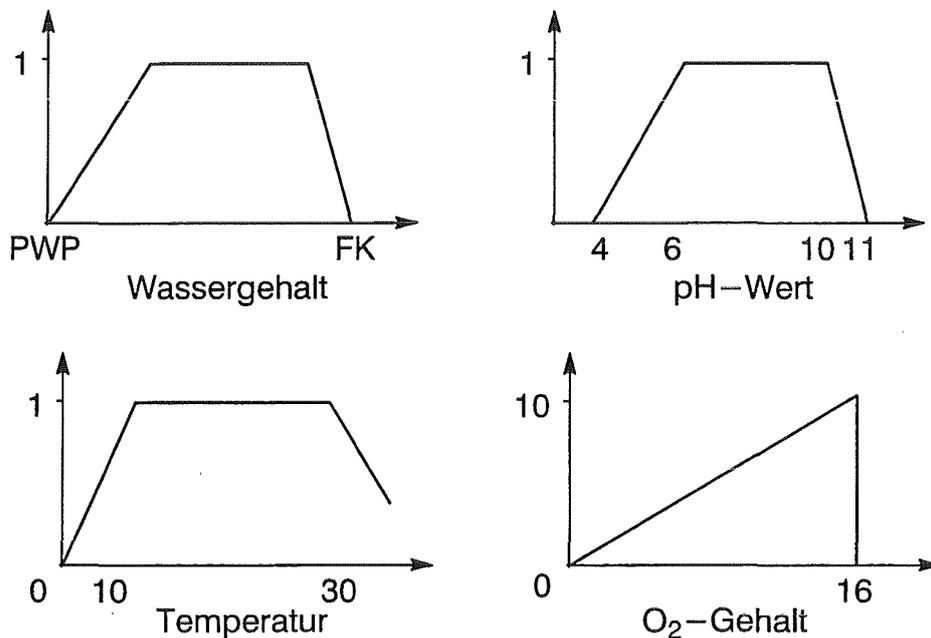


Bild 2: Einfluß der Bodenzustände auf die Umsetzungsprozesse (Beispiel: Nitrifikation)

Auch bei einer möglichen Abschätzung der Bandbreiten und Verteilungen der Umsatzraten bleibt als landwirtschaftliches Kernproblem die Tatsache, daß die Mineralisierung sich wie eine nichtsteuerbare Stickstoffquelle verhält. Das Maximum der Nachlieferung durch Mineralisierung ist an warme Bodentemperaturen gebunden und liegt deshalb deutlich später als der Pflanzenbedarf. Zur Erzielung einer Ernte muß zu Beginn der Vegetationsperiode Stickstoff aufgenommen werden. Deshalb wird zeitig gedüngt (z.B. 100 kg N/ha, um die Größenordnung zu kennzeichnen), obwohl im Boden bis zu 10000 kg N/ha vorhanden sein können. Bei entsprechender Nettomineralisation im Herbst kann die dann eintretende Nachlieferung eventuell nicht mehr von der Pflanze aufgenommen werden und ist deshalb im Winter bei entsprechendem Regenüberschuß auswaschungsgefährdet.

2.2 Abbildung von Parameterverteilungen

Das Problem der Risikoanalyse des Eintrags von Nitrat in das Grundwasser reduziert sich also weitgehend auf die Betrachtung von Parameterunsicherheiten in einem Modell nichtlinearer Differentialgleichungen. Annahmen über die Verteilungen der unsicheren Parameter sowie deren Grenzwerte lassen sich aufgrund des vorhandenen Wissens angeben. Je nach Verteilung sind dies (auf 1 normierte) Häufigkeiten, die auf Messungen basieren, oder nichtnormierte Möglichkeiten (Zugehörigkeiten), die eher auf Annahmen beruhen. Die Abbildung dieser Eingangsverteilungen geschieht mit Monte Carlo-Techniken oder Diskretisierungen (α -cut Verfahren). Ausgangsgröße ist bei dem dazwischenliegenden dynamischen Modell z.B. die Verteilung des Endwertes 'kumulierte Menge des eingewaschenen Nitrats in Jahresfrist'.

3 Abbildung von Parameterunsicherheiten

3.1 Monte Carlo Analyse

Der direkte Weg zur Abbildung beliebiger Verteilungen (unabhängig, ob im Wahrscheinlichkeits- oder im Fuzzy-Kontext) ist die Monte Carlo Analyse, ein numerisches Experiment mit statistischer Auswertung der Modellantworten. Die Unsicherheiten reduzieren sich auf eine zufällige Auswahl aus den vorgegebenen Parameterverteilungen. Der Formelaufwand ist gering, eine Reformulierung des Modells ist nicht nötig. Jedoch ist die benötigte Rechenleistung

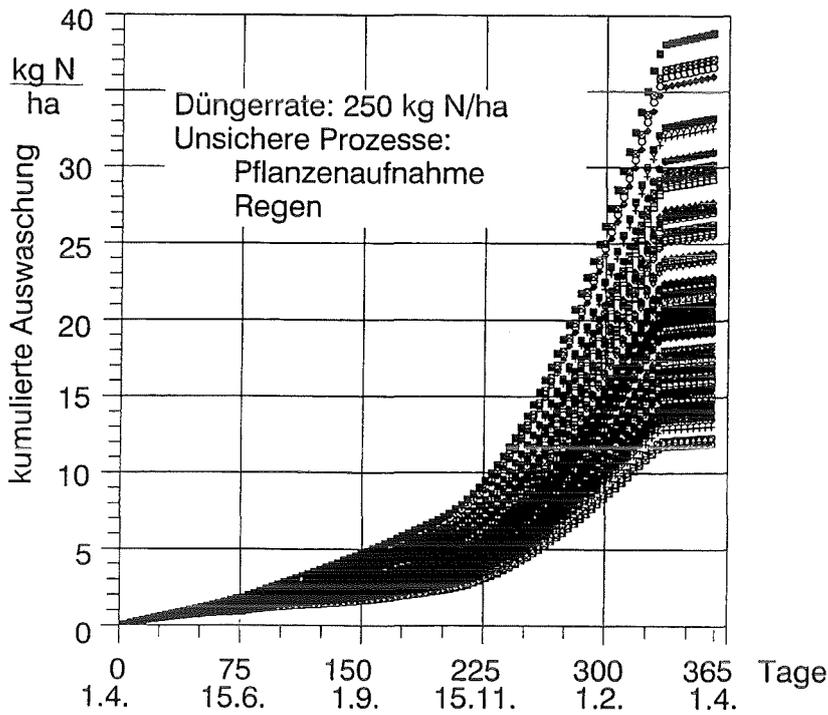


Bild 3: Zufallsläufe für die kumulierte Stickstoffauswaschung

Bandbreiten möglicher Auswaschungen bei ca. 300 kg N/ha auf Grünland

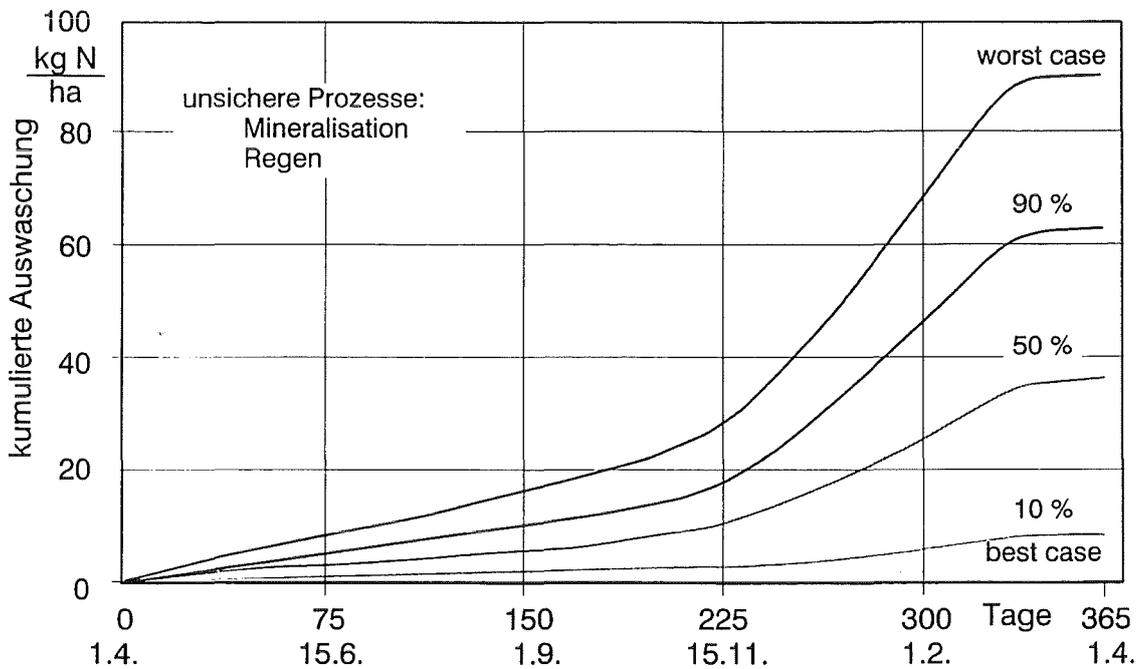


Bild 4: Grenzkurven für die Risikoanalyse der Stickstoffauswaschung

groß. Trotzdem bleibt als Vorteil, zur Bewältigung des Problems maschinelle statt menschliche Ressourcen einzusetzen.

Bild 3 zeigt die aufgrund der vorgegebenen Parameterschwankungen errechnenden Verläufe für die kumulierte Stickstoffauswaschung über ein Jahr. Neben der Klassierung der Endwerte in eine Ausgangsverteilung sind bei Risikobetrachtungen auch die Grenzkurven für das ungünstigste Zusammentreffen der variablen Parameter, ein 90stes Perzentil (in 90 % aller zufälligen Eingangsvariationen liegt der Wert unter der angegebenen Kurve), die Mittelwertkurve etc. von Interesse (Bild 4).

Als praktisches Problem bleibt bei der Monte Carlo Analyse die benötigte Rechenzeit. Jedoch wird diese häufig überschätzt, zumal auch größere Differentialgleichungssysteme mit Workstations in kurzer Zeit gelöst werden können, sofern sie 'vernünftig' sind. Die benötigte Anzahl der Testläufe ist von der Feinheit der Verteilungen abhängig, also linear (nicht exponentiell) von der Parameterzahl abhängig. Nach [2] ergibt sich mit $m = p(1-p)(2/\Delta p)^2$ z.B. für das 90. Perzentil ($p = 0,9$) und eine 5 % Aussagesicherheit ($\Delta p = 0,05$) ein Wert von $m = 144$, der eventuell noch mit der Anzahl der Eingangsverteilungen zu multiplizieren ist. Vorschläge zur Verminderung der Testläufe sind zahlreich und z.B. in [3] zusammengestellt.

3.2 α -cut Verfahren

Eine zweite Möglichkeit einer numerischen Annäherung einer Ausgangsverteilung besteht durch Diskretisierung der Eingangsverteilungen. Hier geschieht eine gezielte Auswahl aus den Eingangsverteilungen. Auch hier wird nur das Originalmodell verwendet. Jedoch ist das α -cut Verfahren nur im Fuzzy-Kontext verwendbar [4].

Bild 5 zeigt die Vorgehensweise im Fall zweier Eingangsverteilungen (Zugehörigkeitsfunktionen). Man startet mit der Zugehörigkeit 1 und erhält einen zugehörigen Punkt im Parameterraum. Je nach Diskretisierung der Zugehörigkeitsfunktionen (z.B. $\alpha = 0,9; 0,8; \dots 0,1; 0$) erhält man einen immer größer werdenden Parameterraum. Wegen der max-min Logik im Fuzzy-Kontext weiß man, daß der gesuchte Extremwert auf einem der Eckpunkte des aufgespannten Vertex im Parameterraum liegen muß, jedenfalls sofern es sich um eine monotone Ausgangsfunktion handelt. In diesem Fall sind nur noch alle Eckpunkte des zur Zugehörigkeit

Diskretisierung der Zugehörigkeitsfunktionen statt der Parameter

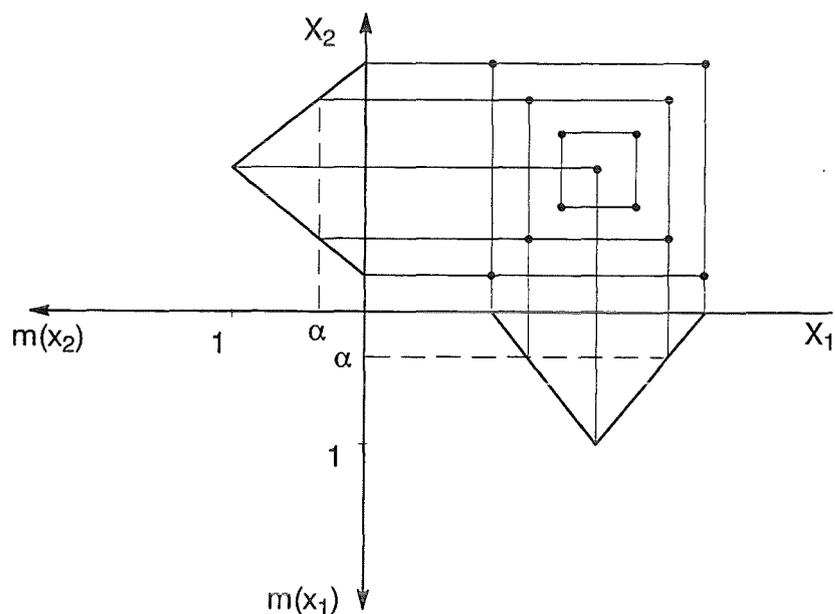


Bild 5: Diskretisierung des Parameterraumes nach dem α -cut-Verfahren

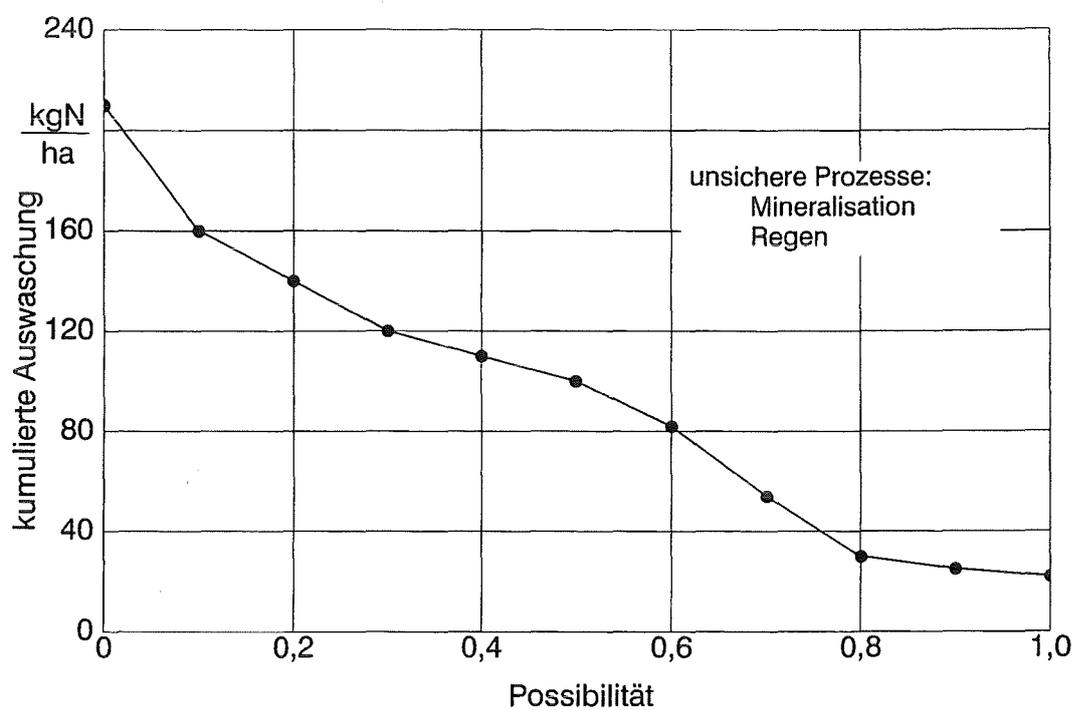


Bild 6: Ausgangsverteilung der Möglichkeit einer Auswaschung

α gehörenden Vertex modellmäßig zu berechnen, so daß bei m Stufungen für α und n Parametern sich nur noch $2 \cdot m \cdot n$ Versuche ergeben.

Das praktische Problem liegt hier in der Tatsache, daß bei komplexen Modellen keine monotone Abbildung angenommen werden kann. Statt nur die Eckpunkte zu durchsuchen, muß auch nach (unbekannten!) Extremwerten im Parameterraum gesucht werden. Eine nachgeschaltete Optimierung auch nur im zusätzlichen Parameterraum ist jedoch rechenzeitaufwendig und zerstört sofort alle Vorteile. Jedoch ist ohne nachgeschaltete Suche, ob ein Extremwert auch innerhalb des Parameterraumes liegt, im Normalfall keine Aussage möglich. Für Risikobetrachtungen wird bei der sich so ergebenden Ausgangszugehörigkeitsfunktion üblicherweise die x - und y -Achse vertauscht, denn das unerwünschte Ergebnis ist die Auswaschung (Bild 6).

4 Ansätze zur Verbesserung der Aussageschärfe

Das generelle Problem bei der Abbildung von Eingangsverteilungen auf einen Ausgang ist, daß je nach Modell und Parametern eventuell eine sehr weite Ausgangsverteilung sich ergeben kann. Und eine Aussage, eine mögliche (oder wahrscheinliche) Auswaschung liegt in einem über Zehnerpotenzen sich erstreckenden Bereich hat keinen praktischen Wert. Methoden zur Erhöhung der Aussageschärfe sind deshalb gesucht.

4.1 Beziehungen zwischen Eingangsparametern

Eine direkte Methode zur Verbesserung der Aussageschärfe besteht in der Berücksichtigung von Regeln oder Beziehungen zwischen den Eingangsparametern. Im betrachteten Beispiel der Möglichkeiten oder Wahrscheinlichkeiten einer Nitratauswaschung unter Grünland ist bekannt, daß die Mehrzahl der Stickstofftransformationen mikrobielle Prozesse sind, die auf Streß infolge Kälte, pH-Wert, Trockenheit etc. ähnlich reagieren. Es ist deshalb nicht nötig zu wissen, warum ein Parameterwert groß oder klein ist; entscheidend ist zu wissen, daß auch die anderen Parameter in diesem Fall groß oder klein sind. Die Berücksichtigung von Korrelationen zwischen den Eingangsparametern ist ebenso einfach wirkungsvoll. An der Monte Carlo Analyse ändert sich nichts, außer daß die Aussageschärfe größer und die Anzahl der Testläufe kleiner wird.

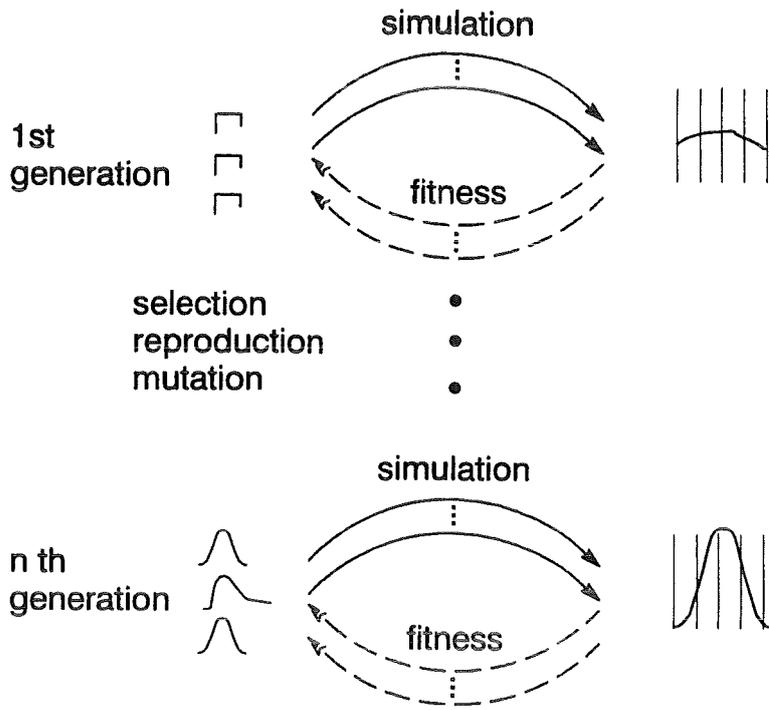


Bild 7: Anpassung von Verteilungen durch genetische Algorithmen

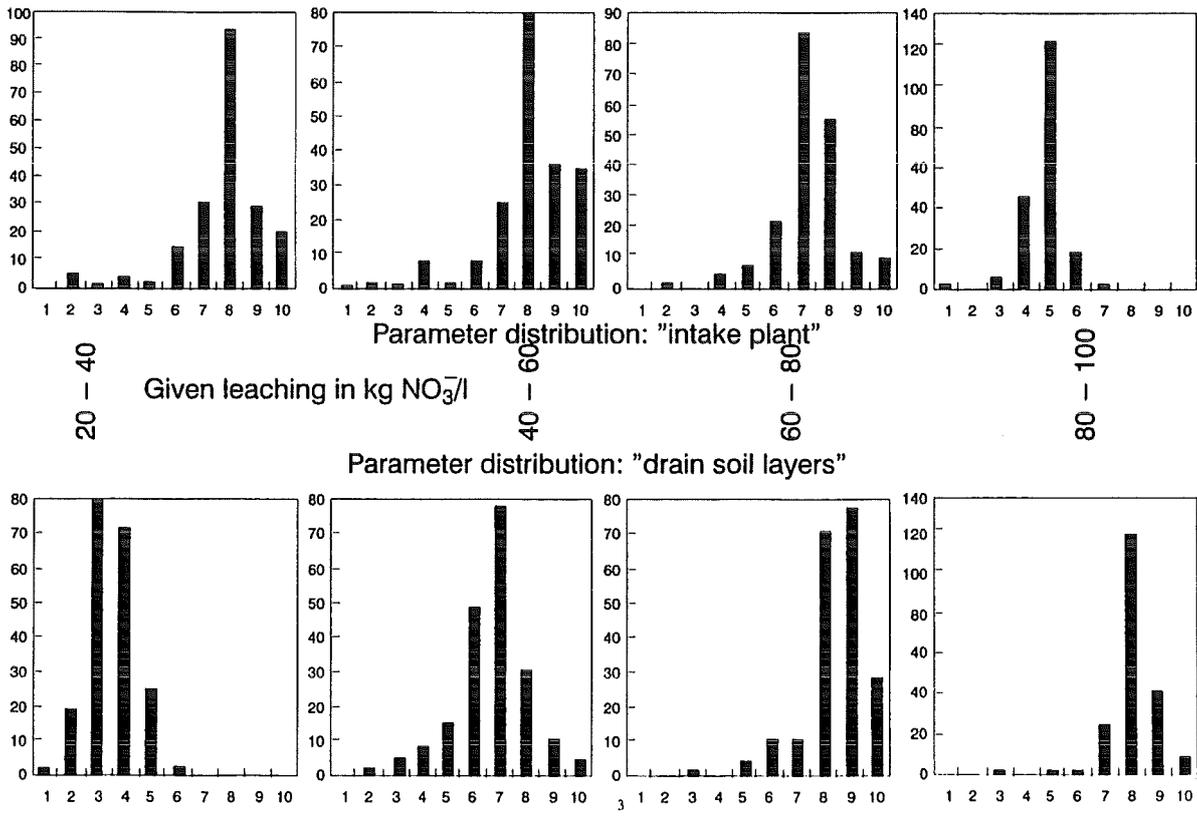


Bild 8: Verteilungen ausgewählter Eingangsparameter je nach Ausgangsergebnissen

Ebenso einfach und wirkungsvoll ist die Berücksichtigung von wenn-dann Regeln zwischen den Eingangsparametern. Am α -cut Verfahren ändert sich prinzipiell nichts, außer daß die Aussageschärfe größer und der zu untersuchende Parameterraum kleiner wird. Die Berücksichtigung von 'Handwerkswissen' hat bei Modellbetrachtungen noch nie geschadet.

4.2 Inverse Abbildungen

'Handwerkswissen' liegt aber nicht nur in Verknüpfungen zwischen Eingangsgrößen vor, sondern meist auch zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen oder nur über Ausgangsgrößen. Jedenfalls ist Wissen über den Ausgang meist eher vorhanden als Wissen über Eingangsparameter. Im Fall eines konzentrierten Ausgangsergebnisses und konzentrierter Eingangsparameter benutzt man die Techniken der Parameteroptimierung, um eine Parameterkombination zu berechnen, bei der das Simulationsergebnis möglichst nahe einem vorgegebenen Wert liegt. Bei Verteilungen ist das Vorgehen ähnlich (Bild 7). Durch Klassierung am Ausgang kann man Eingangsverteilungen berechnen. Im Bild 8 sind am Beispiel unterschiedlicher Auswaschungsergebnisse die sich ergebenden Verteilungen der ausgewählten Eingangsparameter 'Aufnahme' und 'Transfer' dargestellt. Eine direkte Suchtechnik ergibt sich ferner durch die Populationen von Parametern behandelnden genetischen Algorithmen. Diese auf Selektion, Reproduktion und Mutation beruhenden Optimierungstechniken sind in der Lage, mit entsprechendem Rechenaufwand das Problem der inversen Abbildung von Verteilungen direkt zu bearbeiten [5].

5 Ergebnisse

Als Ergebnisse der Risikoanalyse von möglichen Nitrat Auswaschungen unter Grünland erhält man mit den angewendeten Methoden ein deutlich besseres 'Fingergefühl' für die Parameterinflüsse als mit Empfindlichkeitsmethoden sowie erste Ergebnisse über Grenzwerte und Düngungsempfehlungen. So ist z.B. ein Ergebnis, daß entgegen vielen Behauptungen die Düngerart weitgehend uninteressant ist. Wichtig in bezug auf eine mögliche Auswaschung ist vielmehr die Düngermenge und der Düngerzeitpunkt. Ferner sind die Prozesse der Nitrifikation und der Humifizierung von geringerem Einfluß. Wichtig und deshalb genauer zu betrachten sind die Nettomineralisation und die Aufnahme durch die Pflanze. Bei einem Weidebe-

trieb ist die 'punktförmige' Belastung in Form von bevorzugten Kotstellen bedenklich, bei Mähwiesen kann ab 200 kg N/ha eine erhöhte Auswaschungsgefahr bestehen. Auf die Tatsache, daß auch erhöhte Gaben aus vielerlei Gründen längst nicht automatisch zu einer Trinkwassergefährdung führen, kann nur abschließend hingewiesen werden.

Literatur

- [1] Haverkamp, R. et al., 1977. A Comparison of Numerical Simulation Models for One-Dimensional Infiltration. Soil Sci., Soc. Am. J. 41(4):285-293.
- [2] Morgan, M.G., and Henrion, M., 1990. Uncertainty. Cambridge University Press, Cambridge 1990.
- [3] Rubinstein, R.Y., 1981. Simulation and the Monte Carlo Method. John Wiley & Sons, New York 1981.
- [4] Dong, W., and Shaw, H.C., 1987. Vertex Method for Computing Functions of Fuzzy Variables. Fuzzy Set and Systems 24:65-78.
- [5] Goldberg, D.E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison Wesley, Reading 1989.

Qualitative Simulation mit *QualSim*

Rüdiger Hohmann · Erik Möbus
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Institut für Simulation und Graphik

1 Einleitung

Um das dynamische Verhalten kontinuierlicher Systeme in mathematischen Modellen zu beschreiben, benutzt man Differentialgleichungen zur Beschreibung. Mittels verschiedener Simulationssprachen, zum Beispiel ACSL, werden diese dann numerisch gelöst. Zum Aufstellen dieser Gleichungen werden allerdings exakte physikalische Parameter benötigt, die jedoch häufig nicht vorhanden sind und auch nicht näherungsweise bestimmt werden können. Manchmal hat man von den Parametern lediglich eine Vorstellung von der Größenordnung. Des weiteren gibt es Aufgaben, wo die Verhaltensvielfalt interessiert, d.h. man ist bestrebt, neben dem bekannten Systemverhalten auch jenes zu ermitteln, das u.U. nur dann auftritt, wenn irgendein Parameter einen extremen Wert annimmt. (Dazu wäre es dann notwendig zu wissen, welcher Parameter welchen Extremwert annehmen kann, um dann zu untersuchen, ob und wie sich dadurch das Systemverhalten ändert.)

Während nun numerische Verfahren, die in kontinuierlichen Simulationssprachen benutzt werden, kaum oder gar nicht angewendet werden können, da die notwendigen numerischen Daten fehlen, ist es sehr wohl möglich, qualitative Simulationsverfahren einzusetzen, die mit den Größenordnungen der Parameter auskommen. Diese haben außerdem den Vorteil, daß in einem Simulationslauf die vollständige Lösungsvielfalt ermittelt wird.

Das hier vorgestellte und benutzte QualSim ist in [1] beschrieben und wurde vom Autor F.E. Cellier in einer CTRL-C-Version zur Verfügung gestellt. Diese wurde in M-Files unter MATLAB umgesetzt.

In qualitativen Verfahren wird das qualitative Wissen mittels qualitativer Werte repräsentiert, durch die die betrachteten physikalischen Größen dargestellt werden. Die physikalischen Größen werden dazu in Intervalle abgebildet (In QualSim: $(-\infty,0)$; $[0,0]$; $(0,+\infty)$), die ihrerseits durch qualitative Werte dargestellt werden (hier: '-', '0', '+'). Aufgrund der so aufgestellten Modelle kann man nun mittels qualitativer Simulation die mögliche Lösungsvielfalt ermitteln.

2 Das QualSim-Verfahren

2.1 Qualitative Zustandsgrößen und Rechenoperationen

Die Zustandsgrößen eines qualitativen Systems werden durch Differentialgleichungen beschrieben, Zustände durch Funktionswerte. Diese Zustände werden bei der Simulation in gewissen zeitlichen Abständen erfaßt. (In kontinuierlichen Systemen sind diese Abstände im allgemeinen fest, im Unterschied zu diskreten Sprachen.)

Im QualSim-Verfahren werden die Zustände in Vektorpaaren dargestellt: in einem Wertevektor x und in einem Änderungsvektor \dot{x} . Diese Vektoren enthalten jeweils drei Werte.

$$x = (x_1, x_2, x_3); \quad \dot{x} = (\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3)$$

x_1 ist der qualitative Wert, x_2 dessen erste, x_3 dessen zweite Ableitung; \dot{x}_1 beschreibt die (qualitative) Änderung, \dot{x}_2 deren erste, \dot{x}_3 deren zweite Ableitung. \dot{x}_1 entspricht also ebenfalls der ersten Ableitung von x_1 (d.h. $\dot{x}_1 = \dot{x}_2$). Diese Redundanz hat praktische Gründe. Während in anderen qualitativen Simulationsverfahren häufig nur die erste und zweite Ableitung, manchmal nur die erste Ableitung einbezogen wird, werden in QualSim die Ableitungen bis zum dritten bzw. vierten Grad benutzt. Dies führt zu einer besseren Beschreibung und Vorhersagemöglichkeit des Verlaufs und damit zur Reduzierung der Fälle/Lösungsmanigfaltigkeit.

Um qualitative Funktionen aufstellen zu können, müssen auch die Rechenoperationen qualitativ definiert werden. Hierzu ist es allerdings notwendig, zwei weitere Elemente einzuführen: '?' für einen unbekanntem Wert und 'U' für einen ungültigen Wert.

Für die Addition zweier qualitativer Werte gilt, wie leicht einzusehen ist, folgende Wahrheitstabelle:

ADD: x\y	-	0	+	?
-	-	-	?	?
0	-	0	+	?
+	?	+	+	?
?	?	?	?	?

Die anderen Grundrechenarten lassen sich durch folgende Wahrheitstabellen beschreiben:

MULT: x\y	-	0	+	?	SUB: x\y	-	0	+	?	DIV: x\y	-	0	+	?
-	+	0	-	?	-	?	-	-	?	-	+	U	-	?
0	0	0	0	0	0	+	0	-	?	0	0	U	0	0
+	-	0	+	?	+	+	+	?	?	+	-	U	+	?
?	?	0	?	?	?	?	?	?	?	?	?	U	?	?

In der programmtechnischen Realisierung sind die qualitativen Elemente durch Zahlen repräsentiert: '-' als 1, '0' als 2, '+' als 3, '?' als 4 und 'U' als 5; statt der Tabellen werden Matrizen verwendet, so daß sich beispielsweise für die Addition folgende Matrix ergibt:

$$TADD = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 4 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 \\ 4 & 3 & 3 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 \end{pmatrix} \quad \text{(Für die Subtraktion, Multiplikation und Division analog in den Matrizen TSUB, TMULT, TDIV)}$$

Diese Darstellung hat den Vorteil, daß zwei Werte mittels TADD(x, y) addiert werden können, da x und y Integerwerte zwischen 1 und 4 haben und somit als Indizes interpretiert werden können. Falls einer der Werte x, y den Wert 5 (also U) hat, führt die Operation zu einer Fehlernachricht, was insofern sinnvoll ist, da mit ungültigen Werten nicht weitergerechnet wird.

Sollen nun zwei Vektoren addiert bzw. ein Vektor von einem anderen subtrahiert werden, ergeben sich unter Berücksichtigung der Differentiationsregeln folgende Gleichungen:

$$z = x \pm y; \quad z' = x' \pm y'; \quad z'' = x'' \pm y''$$

und damit folgende Funktionen:

```
function z = qadd(x,y)
    for i = 1:3
        z(i) = tadd(x(i),y(i));
    end
return

function z = qsub(x,y)
    for i = 1:3
        z(i) = tsub(x(i),y(i));
    end
return
```

Für die Multiplikation und Division zweier Vektoren ergeben sich unter Berücksichtigung der Differentiationsregeln folgende Gleichungen:

$$z = x \cdot y; \quad z' = x' \cdot y' + x' \cdot y; \quad z'' = x'' \cdot y'' + 2 \cdot x' \cdot y' + x'' \cdot y \quad \text{bzw.}$$

$$z = x / y; \quad z' = (x' \cdot y - x \cdot y') / y^2; \quad z'' = (x'' \cdot y^2 - 2 \cdot x' \cdot y' \cdot y + 2 \cdot x \cdot y' - x \cdot y \cdot y'') / y^3$$

Nach Eliminierung der konstanten Faktoren ergeben sich folgende Implementierungen:

```
function z = qmult(x,y)
    z(1) = tmult(x(1),y(1));
    z(2) = tadd(tmult(x(1),y(2)),tmult(x(2),y(1)));
    aux = tadd(tmult(x(1),y(3)),tmult(x(3),y(1)));
    z(3) = tadd(tmult(x(2),y(2)),aux);
return
```

```

function z = qdiv(x,y)
  z(1) = tdiv(x(1),y(1));
  y2 = tmult(y(1),y(1));
  z(2) = tdiv(tsub(tmult(x(2),y(1)),tmult(x(1),y(2))),y2);
  y3 = tmult(y(1),y2);
  xy = tmult(x(1),y(1));
  vxy = tmult(x(2),y(2));
  vy2 = tmult(y(2),y(2));
  aux1 = tsub(tmult(x(3),y2),tmult(vxy,y(1)));
  aux2 = tsub(tmult(x(1),vy2),tmult(xy,y(3)));
  z(3) = tdiv(tadd(aux1,aux2),y3);
return

```

Des weiteren sind in QualSim noch folgende Funktionen definiert: Exponentialfunktion (qexp), Vorzeichenwechsel (qminus) sowie eine monoton steigende und eine monoton fallende Funktion (mplus, mminus). Allerdings ist es nicht möglich, eine qualitative Entsprechung einer jeden Funktion zu finden. Zum Beispiel hat die Funktion $y = \sin(x)$ keine qualitative Entsprechung, da das Vorzeichen von y vom jeweiligen quantitativen Wert von x abhängt.

2.2 Simulationsalgorithmus

Die eigentliche Simulation läuft dann nach folgendem Algorithmus ab:

1. Ermittlung eines Anfangszustandes
2. Berechnung des/der Folgezustands/-zustände
3. Überprüfung der berechneten Zustände auf Inkonsistenzen und Konflikte
4. Entfernen der inkonsistenten, konfliktbehafteten und unveränderten Zustände
5. Für die übrigen Zustände: solange Anzahl der Simulationsschritte noch nicht erreicht - gehe zu 2.

Der Anfangszustand wird aus den Initialwerten (in einer Datei cqstate_ic gespeichert; unter DOS cqstatic) mittels der qualitativen Differentialgleichungen (in der Datei cqstate) ermittelt. Da auch der Anfangszustand der Konsistenzbedingung genügen muß, d.h. $x_{dot1} = x_2$; $x_{dot2} = x_3$, können die '?' in den Initialvektoren eliminiert werden. (Diese Bedingung wird auch in den folgenden Simulationsschritten benutzt, um unbekannte Werte zu minimieren bzw. inkonsistente Folgezustände zu eliminieren, vgl. Schritte 3. und 4.)

Im Verfahren von Cellier wird, im Gegensatz zu anderen Verfahren, der Folgezustand berechnet. Dazu wird die Integrationsmethode nach Euler verwendet:

$$x_{k+1} = x_k + \Delta t \cdot x_k'$$

deren qualitative Entsprechung wie folgt beschrieben werden kann:

$$x_{k+1} = QADD(x_k, x_k')$$

Bei der qualitativen Simulation ist es, im Unterschied zu den quantitativen Verfahren, möglich, daß ein Zustand mehrere Folgezustände haben kann, die hinsichtlich der Modellbeschreibung konsistent und auch folgerichtig sind. In der Implementation wurde deshalb statt der Funktion QADD eine Funktion QINT verwendet, die in einem Schritt alle Zustände integrieren kann, während QADD auf einen Zustand (d.h. der Addition von zwei Vektoren mit drei Elementen) begrenzt ist.

Diese Zustände können entstehen, wenn beim Integrationsschritt unbekannte Werte, also '?' im Ergebnis enthalten sind.

$$\text{Beispiel: } x_0 = (- + -); \quad x_{dot0} = (+ - +) \Rightarrow x_1 = x_{dot1} = (???)$$

Die unbekanntenen Werte müssen nun durch alle möglichen Kombinationen qualitativer Werte ersetzt werden. Allerdings können hier die Kontinuitätsbedingungen angewendet werden. Eine dieser Bedingungen besagt: Wenn x_k negativ ist, kann x_{k+1} nur negativ oder Null sein, niemals jedoch positiv, da eine Variable nicht vom Negativen ins Positive springen kann, ohne zwischenzeitlich Null zu werden. (Das gleiche gilt im Übrigen ebenso für x_k' und x_k .) Weitere Bedingungen besagen z.B.: Wenn x_k positiv und x_k' positiv oder Null ist, muß x_{k+1} positiv sein und kann nicht Null werden. Durch diese Kontinuitätsbedingungen bleiben im obigen Beispiel von den 27 möglichen Kombinationen aus +, 0, - (resultierend aus drei '?') nur zwei übrig:

$$x_{1a} = (- + -); \quad \dot{x}_{1a} = (+ - +) \quad \text{sowie} \quad x_{1b} = (0 + -); \quad \dot{x}_{1b} = (+ - +)$$

Wenn man nun die Lösung 1a betrachtet, stellt man fest, daß sie mit dem Zustand 0 identisch ist. Deshalb kommt hier eine weitere Bedingung ins Spiel: die Zustandsstetigkeitsbedingung. Offenbar könnte, da die Zustände 0 und 1a identisch sind, dieser Zustand für immer beibehalten werden, obwohl eine negative, stetig steigende Funktion irgendwann einmal Null werden sollte. Deshalb wird der Vektor x_{1a} ersetzt durch (0 + -). Da dieser neue Vektor x_{1a} identisch mit dem Vektor x_{1b} ist, kann er entfernt werden, und man erhält:

$$x_1 = (0 + -); \quad \dot{x}_1 = (+ - +).$$

Dieses Vorgehen wird beibehalten, bis die vorgegebene Anzahl der Simulationsschritte erreicht ist.

2.3 Einführungsbeispiel

Zum besseren Verständnis soll nun ein relativ einfaches Modell als Beispiel folgen: eine exponentiell verzögerte Anpassung

Dem Modell liegt folgende Differentialgleichung zugrunde: $dx/dt = u - a \cdot x$

Dabei bezeichnet x die Zustandsgröße, u eine (positive) Eingangsgröße (oder -funktion), an die sich die Zustandsgröße angleicht, und a die Dämpfung der Anpassung (ebenfalls positiv, i.allg. konstant).

Das Modell ist ausführlich in [2] beschrieben.

Das qualitative Modell hat folgendes Aussehen:

```
function x = cqstatic(dummy)
    global izero                % die globale Variable izero = ( 0 ?? ) wird in der Funktion verwendet
    x = izero;                  % der Anfangswert von x ist 0 mit unbekanntenen Werten für x_1' und x_1''
    return

function xdot = cqstate(x)
    global cplus                % die globale Variable cplus = ( + 0 0 ) wird verwendet
    u = cplus;                  % u ist eine positive Konstante
    xdot = qsub(u,x);           % x' = u - x; da sich ein qualitativer Wert durch Multiplikation mit einer
    return                       % | positiven Konstante nicht ändert, konnte a weggelassen werden
```

Die Ausgabegröße wird in einer Funktion QOUT festgelegt (erst bei mehreren Zustandsgrößen von Bedeutung):

```
function y = qout(x)
    y = x;
    return
```

Das gleiche Problem hat in ACSL folgende Form:

```
PROGRAM verzoegerung
CONSTANT u = 10, a = 1.5, x0 = 0
dx = u-a*x
x = INTEG (dx, x0)
TERMT (t .GE. 10)
END
```

Die qualitative Simulation verläuft dann wie folgt:

t	x_t	x_t'	
0	(0 ? ?)	(+ ? ?)	
0	(0 + ?)	(+ - ?)	
0	(0 + -)	(+ - +)	
1	(+ ? ?)	(? ? ?)	durch Anwendung der drei Bedingungen werden die '?' eliminiert
1	(+ + -)	(+ - +)	
2	(+ ? ?)	(? ? ?)	durch Anwendung der drei Bedingungen werden die '?' eliminiert
2	(+ + -)	(+ - +)	wegen der Zustandsstetigkeitsbed. ($x' = +$, $x'' = -$) muß x' Null werden
3	(+ 0 -)	(0 - +)	die Konsistenzbedingung ist verletzt, $x^{(3)}$ und $x^{(4)}$ müssen geändert werden
3	(+ 0 0)	(0 0 0)	
4	(+ 0 0)	(0 0 0)	die Anwendung der Zustandsstetigkeitsbed. führt zu keiner neuen Lösung, ein stabiler Zustand wurde erreicht, weitere Integrationen bleiben in diesem Zustand.

Die nach vier Schritten gefundene Lösung kann nun mit der Funktion QPLOT graphisch ausgegeben werden, das Ergebnis findet sich in Bild 1a. Zum Vergleich ist in Bild 1b die graphische Darstellung der Lösung des ACSL-Programms angegeben.

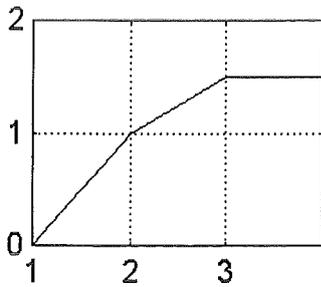


Bild 1a. Lösung des qualitativen Modells

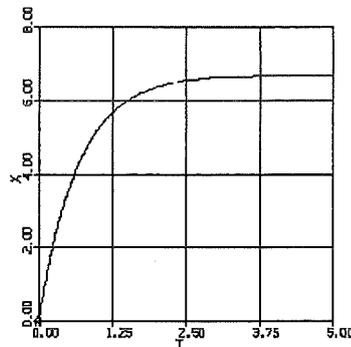


Bild 1b. Lösung des ACSL-Programms

3 Vergleich von qualitativen mit quantitativen Modellen

3.1 Logistisches Wachstum

Ein grundlegender Prozeß in der Natur ist das logistische Wachstum, das in vielen Bereichen in der Natur anzutreffen ist.

Es ist gekennzeichnet durch schnelles, fast exponentielles Wachstum bei kleinem Bestand. Nahe der Kapazitätsgrenze tritt zunehmend eine negative Rückkopplung ein, die den Bestand an dieser Grenze einregelt. Falls es einen Abfluß aus dem Bestand, beispielsweise durch Ernte, gibt, bleibt ein Gleichgewicht erhalten, solange die Abfluß-(Ernte-)Rate klein genug ist. Wird ein kritischer Betrag überschritten, kommt es zum Zusammenbruch des Systems.

Das Modell wurde [2] entnommen. Dort wurden drei Fälle untersucht:

1. Kapazitätsgrenze =1, Ernterate=0
2. Kapazitätsgrenze=1, Ernterate>0
3. $k=-1$, Ernterate=0 (k kann nun allerdings nicht mehr als Kapazitätsgrenze bezeichnet werden)

In ACSL hat das ursprüngliche Modell folgendes Aussehen:

```
PROGRAM Bossel_M107

"---Modellkonstanten"
"      a - max. spez.Wachstumsrate, h - Ernterate, k - Kapazitätsgrenze
CONSTANT a=1.0 , h=.0 , k=-1.0

"---Initialparameter"
CONSTANT z0=.01

"---Modellgleichung"
dz = a*z*(1-(z/k))-h

"---Integral"
z = INTEG(dz,z0)

TERMT( t .GT. 12)
END
```

Die drei oben beschriebenen Fälle erhält man durch Änderung der entsprechenden Parameter. Im qualitativen Modell wurden diese drei Fälle ebenfalls untersucht; es entsteht folgendes Modell:

```
function xdot=cqstate(x)
% Simulation: M 107
% logistisches Wachstum

% Konstantenfestlegung
global cplus

% dz/dt = a*(z-z2/k)-h; a>0 (def) => entf. im qual. Modell

% Fall 1: h=0, k=1 => dz/dt=a*(z-z2)
xdot = qsub(x,qmult(x,x));

% Fall 2: h>0, k=1 => dz/dt=a*(z-z2)-h
% xdot = qsub(qsub(x,qmult(x,x)),cplus);

% Fall 3: h=0, k-1 => dz/dt=a*(z+z2)
% xdot = qadd(x,qmult(x,x));

return

function x = cqstatic(dummy)
% Simulation: M 107
% Initialparameter

global iplus
x = iplus;
return
```

Im ersten Fall ergab die Simulation dieses Problems mit 8 Simulationsschritten eine Lösungsmatrix mit 8 Zeilen und 21 Spalten, d.h. 7 Lösungen. Die graphische Ausgabe lieferte 5 Bilder, da Lösungen, die zu gleichen Darstellung führen, nur einmal ausgegeben werden. Aber auch diese ähnelten sich zum größten Teil, so daß hier nur 3 Lösungen graphisch aufgeführt sind (Bilder 2a bis 2c).

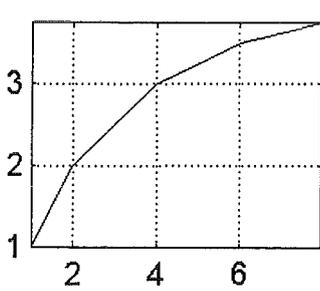


Bild 2a

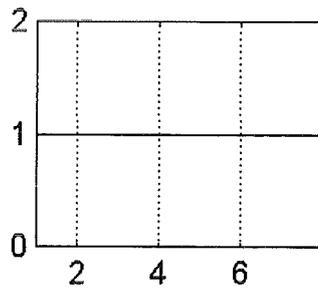


Bild 2b

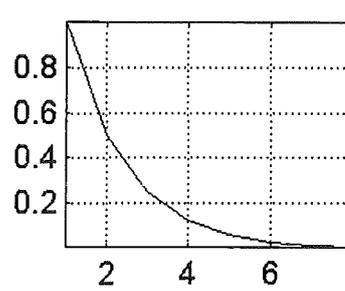


Bild 2c

Obenstehendes ACSL-Programm lieferte die in Bild 3a dargestellte Lösung. Durch Veränderung der Anfangspopulation z_0 konnten die in den Bildern 3b und 3c dargestellten Lösungen erzeugt werden, die QualSim als mögliche Lösung gefunden hatte.

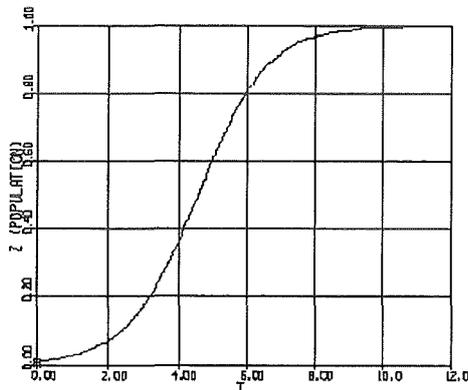


Bild 3a. Ergebnis mit Normalparametern

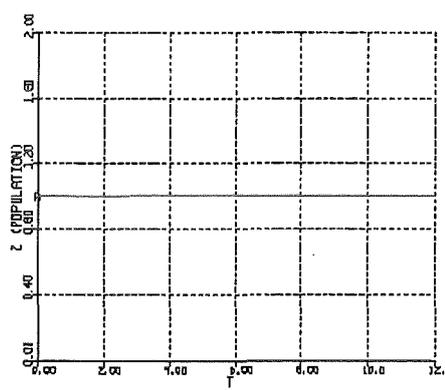


Bild 3b. Es wurde lediglich z_0 auf 1 gesetzt

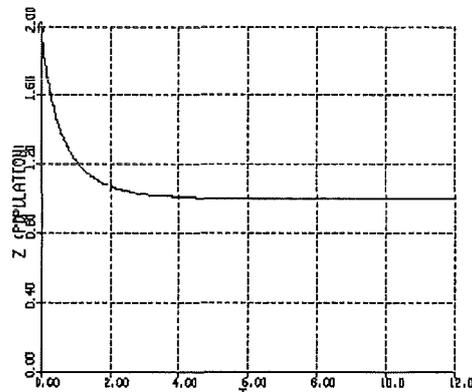


Bild 3c. Die Anfangspopulation z_0 beträgt hier 2

Im zweiten Fall ergab die Simulation dieses Problems eine Lösungsmatrix mit 8 Zeilen und 39 Spalten, d.h. 13 Lösungen. Die graphische Ausgabe lieferte 9 Bilder. Wiederum sind wegen deren Ähnlichkeit nur 4 Lösungen graphisch aufgeführt (Bilder 4a bis 4d).

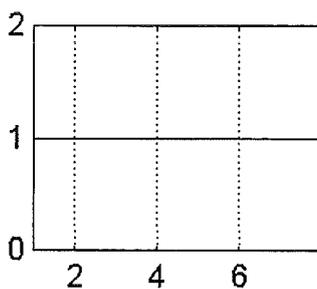


Bild 4a

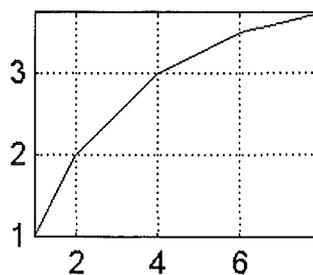


Bild 4b

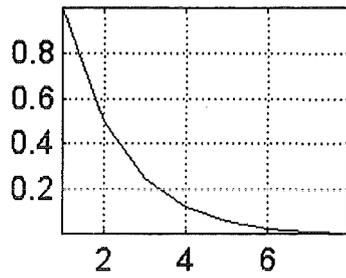


Bild 4c

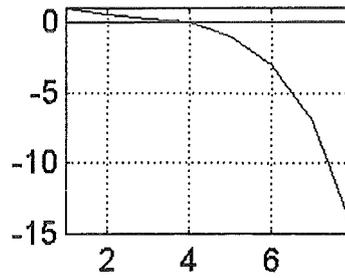


Bild 4d

Im ACSL-Programm wurde die Ernterate h nacheinander auf verschiedene Werte gesetzt, so daß folgende Lösungen entstanden:

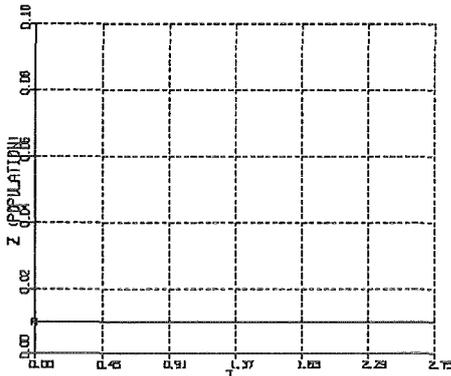


Bild 5a. Ernterate $h=0.0099$

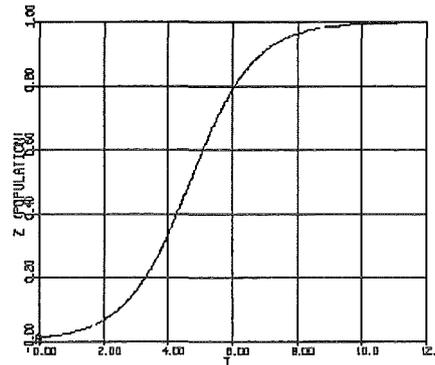


Bild 5b. Ernterate $h=0.001$

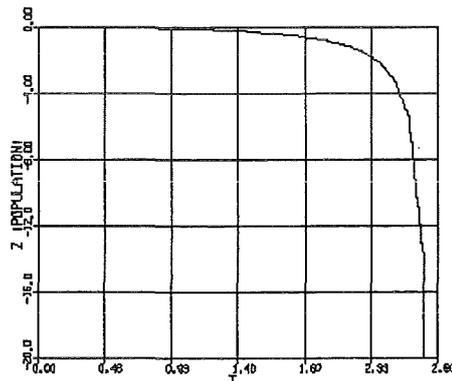


Bild 5c. Ernterate $h=0.1$

Die in Bild 4c dargestellte Lösung ist wahrscheinlich ein sog. "spurious behavior" (falsches Verhalten), das nach dem qualitativen Modell zwar folgerichtig ist, jedoch nach dem quantitativen Modell nicht möglich ist.

Im dritten Fall liefert die qualitative Simulation genau ein Ergebnis (Bild 6a); das entsprechende ACSL-Ergebnis (Bild 6b) wurde erzielt, indem $k = -1$ gesetzt wurde ($h=0$).

Die qualitativen Ergebnisse konnten also (bis auf das eine spurious behavior) recht gut nachvollzogen werden, allerdings mit erheblich größerem Zeitaufwand als die qualitative Simulation erforderte.

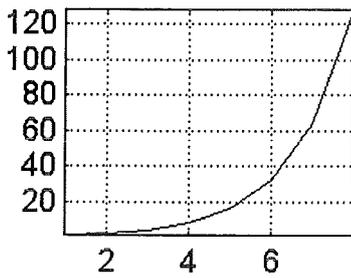


Bild 6a. Ergebnis von QualSim

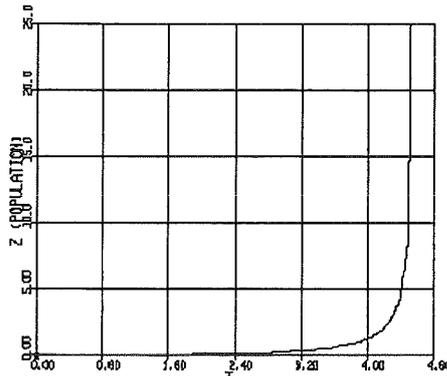


Bild 6b. ACSL-Ergebnis

3.2 Historischer Zusammenbruch eines Ökosystems

Es soll nun ein weiteres Beispiel folgen: Der historische Zusammenbruch des Ökosystems auf dem Kaibab-Plateau in Arizona, USA :

Um die Jahrhundertwende lebten auf dem Kaibab-Plateau ca. 4000 Weißwedelhirsche. Dieses Plateau umfaßt eine Fläche von rund 727000 acres (ca. 294000 ha). Im Jahre 1907 wurde auf den Abschluß von Raubtieren (Berglöwen, Wölfe, Kojoten) eine Prämie ausgesetzt, da die Hirsche zu deren Nahrung zählten. Das hatte eine rapide Abnahme der Räuber zur Folge, während die Wildpopulation stark zunahm (im Jahre 1924 erreichte sie geschätzte 100000 Hirsche). Da der Nahrungsvorrat nicht ausreichte, verhungerte in den nächsten Jahren der größte Teil der Hirsche. Da auch das Vegetationssystem nachhaltig zerstört wurde, konnte das Ökosystem schließlich nur noch einen geringen Teil der Wildpopulation ernähren, die es vorher tragen konnte.

Das hier verwendete Modell geht auf Goodman und Meadows zurück. Es wurde [3] entnommen und in ACSL umgesetzt.

PROGRAM KAIBAB

"Modell des historischen Zusammenbruchs eines Ökosystems"

"-----"

"---Modellkonstanten"

CONSTANT FLAECH=800000, MFK=4.8E8, FMPW=2000

"---Anfangswerte"

CONSTANT WILDP0=4000, FUT0=4.7E8

"---Umrechnungsfunktion"

JAHR=T+1900

"---Tabellenfunktionen"

TABLE RAUBP,1,3/0,20,50,266,0,0/

"~~~alternative Abschlußstrategie"

"TABLE RAUBP,1,3/0,12.48,50,266,100,100/"

TABLE FNZ,1,5/0,0.25,0.5,0.75,1,35,15,5,1.5,1/

TABLE WBRPR,1,6/0,0.005,0.01,0.02,0.025,0.05,0,3,13,51,56,56/

TABLE WRNZR,1,5/0,500,1500,2000,3000,-0.5,-0.15,0.15,0.2,0.2/

"---algebraische Gleichungen"

FPW=FUTTER/WILDP

WDICHT=WILDP/FLAECH

X=FUTTER/MFK

WNZR=WILDP*WRNZR (FPW)

WBR=RAUBP (T) *WBRPR (WDICHT)

FNR= (MFK-FUTTER) /FNZ (X)

"~~~FVR=min (FUTTER, WILDP*FMPW) "

FVR=RSW (FUTTER .LE. WILDP*FMPW, FUTTER, WILDP*FMPW)

"---Integrale"

WILDP=INTEG (WNZR-WBR, WILDP0)

FUTTER=INTEG (FNR-FVR, FUT0)

"---Abbruch nach 50 Jahren"

TERMT (T .GE. 50.0)

END

Die in Bild 7a dargestellte Kurve entspricht dem historisch beobachteten Verlauf. Die "alternative Abschlußstrategie" bewirkt, daß sich ein Gleichgewichtszustand einstellt und daß dabei ein relativ hoher Wildbestand erreicht wird (Bild 7b).

Die in Bild 7c dargestellte Kurve erhält man bei zwanzigfacher, die in Bild 7d dargestellte bei doppelter Eingangspopulation und alternativer Abschlußstrategie, die letzte Kurve (Bild 7e) bei zwanzigfacher Anfangspopulation und tatsächlichem Abschluß. (Das zumindest die zwanzigfache Anfangspopulation völlig unrealistisch ist, sei unbestritten. Wie aber bereits oben gesagt, finden qualitative Simulationsverfahren auch Lösungen, die nur bei Extremparametern auftreten, was hier gezeigt werden soll.)

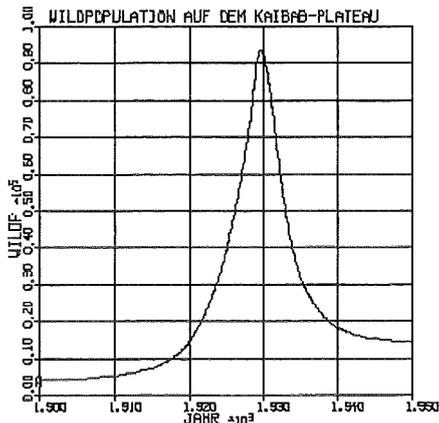


Bild 7a. Originalparameter (tatsächlicher Verlauf)

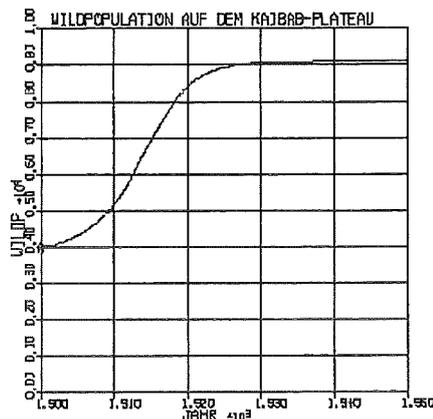


Bild 7b. Alternative Abschlußstrategie

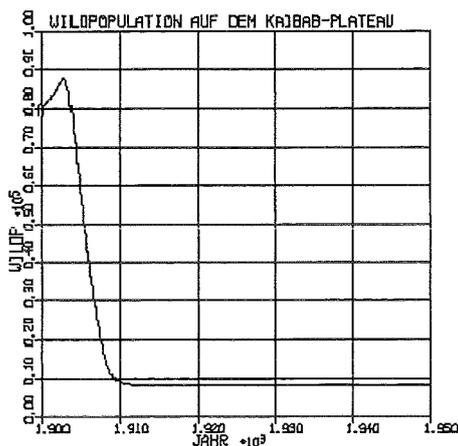


Bild 7c. Zwanzigfache Anfangspopulation, alternative Abschlußstrategie

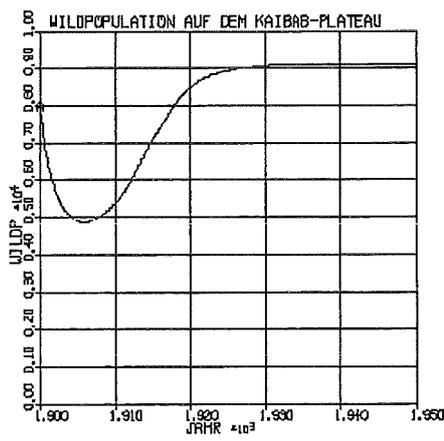


Bild 7d. Doppelte Anfangspopulation, alternative Abschlußstrategie

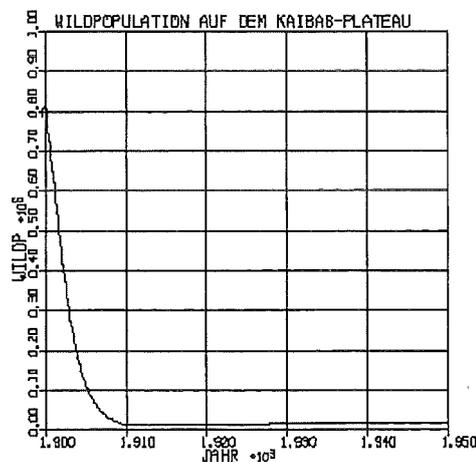


Bild 7e. Zwanzigfache Anfangspopulation, tatsächlicher Abschluß

Qualitatives Modell für die Kaibab-Simulation:

```
function xdot=cqstate(x)
global cplus
% Definition der Konstanten
flaech = cplus;
% Zustandsgrößenübergabe
wildp = x(1:3);
futter = x(4:6);
raubp = [3 1 3];
% algebraische Gleichungen
fpw = qdiv(futter,wildp);
wdicht = qdiv(wildp,flaech);
%  $X = \text{futter}/\text{mfk}$ ;  $\text{mfk} = \text{futter} + c+$  ;  $\text{futter} > 0$ ;
X = cplus;
%  $\text{wrnzs} = f(\text{fpw}) := (\text{fpw}-1000) * a$ ;  $0 < a < 1$ 
wrnzs = qmult(qsub(fpw,cplus),cplus);
wnzs = qmult(wildp,wrnzs);
%  $\text{wbrpr} \sim \text{wdicht}$ 
wbrpr = qmult(cplus,wdicht);
wbr = qmult(raubp,wbrpr);
%  $\text{fnz} \sim X-1$ 
fnz = qdiv(cplus,X);
%  $\text{fnr} = (\text{mfk}-\text{futter})/\text{fnz}$  ;  $\text{mfk} - \text{futter} = c+$ 
fnr = qdiv(cplus,fnz);
%  $\text{fvr} = \min(\text{futter}, \text{wildp} * \text{fmpw})$  ; beide Werte  $> 0 \implies \text{fvr} = c+$ 
fvr = cplus;
% Ableitungen der Zustandsgrößen, Rückgabe
wildp_abl = qsub(wnzs,wbr);
futter_abl = qsub(fnr,fvr);
xdot = [ wildp_abl , futter_abl ];
return

function x = cqstatic(dummy)
global iplus
wildp0 = iplus;
food0 = iplus;
x = [ wildp0 , food0 ];
return

function y = qout(x)
wildp = x(1:3);
futter = x(4:6);
y = [ wildp ];
return
```

Die Simulation dieses Problems mit 20 Simulationsschritten ergab eine Lösungsmatrix mit 20 Zeilen und 834 Spalten, d.h. 278 Lösungen. Die graphische Ausgabe lieferte 42 Bilder. Wegen Ähnlichkeit der Bilder sind hier nur 6 Lösungen graphisch aufgeführt (Bilder 8a bis 8f). Die Berechnung dieser Lösungen dauerte auf einem 486DX2, 66MHz, 8MB unter MATLAB ca. 10 Minuten.

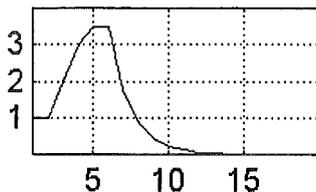


Bild 8a

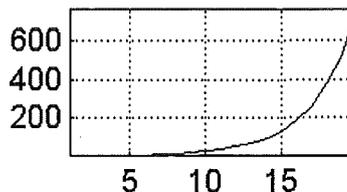


Bild 8b

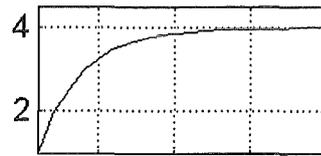


Bild 8c

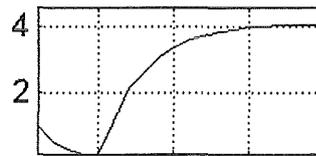


Bild 8d

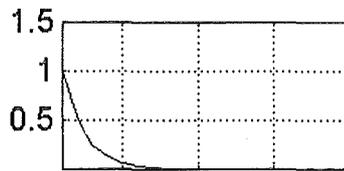


Bild 8e



Bild 8f

Bis auf die letzte sind alle Lösungen nachvollziehbar gewesen. Die Lösung in Bild 8a entspricht den Lösungen in Bild 7a bzw. 7c, 8c entspricht 7b, 8d entspricht 7d und 8e entspricht 7e. Die Lösung 8b findet sich in 7a, 7b und 7c wieder. Ob es sich bei Bild 8f um eine weitere mögliche Lösung oder aber um ein "spurious behavior" (falsches Verhalten) handelt, konnte nicht geklärt werden.

4 Schlußbemerkungen

Auch wenn die Ergebnisse in den angeführten Beispielen ermutigend sind, soll hier darauf hingewiesen werden, daß auch der qualitativen Simulation Grenzen gesetzt sind. Sie kann die quantitative Simulation mit numerischen Parametern nicht ersetzen. Auch ist der Zeitaufwand, um *eine* Lösung zu finden, bei der qualitativen Simulation wesentlich größer, da diese stets *alle* Lösungen ermittelt.

Die Erfassung der Lösungsvielfalt eines Modells kann auch sehr schnell dazu führen, daß das ganze "explodiert", d.h. daß die Anzahl der Lösungen mit jedem Simulationsschritt exponentiell wächst, und man somit schnell an die Grenzen des Computersystems gerät. Das Problem dabei ist aber nicht nur die Speichergröße, sondern vor allem die Rechenzeit, die proportional zur Anzahl der Lösungen steigt.

Auch gibt es, wie bereits gesagt, für viele Funktionen keine qualitative Entsprechung, z. B. für die Sinusfunktion, die aber in vielen Modellen eine entscheidende Rolle spielen.

Die qualitative Simulation ist kein Mittel, um für alle offenen Probleme eine Lösung zu bieten, kann aber einen Beitrag dazu leisten, auf einige Fragen eine Antwort zu finden.

5 Literatur

- [1] Cellier, François Edouard: Continuous System Modelling. Springer Verlag New York/ Berlin/ Heidelberg, 1991; Seiten 507-548
- [2] Bossel, Hartmut: Modellbildung und Simulation. Vieweg Verlag Braunschweig/ Wiesbaden, 1992; Seiten 258-259 und 288-289
- [3] Bossel, Hartmut: Umweltdynamik. te-wi Verlag, München, 1985; Seiten 103-111

Habitatmodellierung im Rahmen der Dynamische Landschaftsmodellierung

Ralf Wieland

Alfred Schultz

Gerd Lutze

ZALF Müncheberg e.V.,*

Zusammenfassung

Für die nachhaltige Nutzung und den Schutz der natürlichen Ressourcen von Kulturlandschaften sind die Prognose und die Bewertung der langfristigen Veränderung landschaftcharakterisierender Zustandsvariablen von großer Bedeutung. Die moderne Agrar- und Landschaftsforschung steht derzeit vor der Herausforderung, dienliche Prognoseinstrumente zu erarbeiten und deren Wirklichkeitsnähe an praxisnahen Pilotfällen in geeigneter Weise zu belegen. Auftreten und Dichte biotische Komponenten nehmen bei der Charakterisierung von Landschaften eine Schlüsselrolle ein. Traditionelle Ansätze zur Modellierung von biotischen Komponenten beschreiben vor allem quantitative Veränderungen in Populationen. In diese Ansätze fließen komplexe Veränderungen von Landschaftsstrukturen nur ungenügend ein. In dem hier vorgestellten Ansatz werden nicht die biologischen Komponenten direkt modelliert, sondern die Veränderungen in der Landschaft werden auf eine Veränderung ihrer Lebensräume abgebildet, d.h. es wird sich eindeutig auf einen Flächenbezug orientiert. Dabei kommt ein Fuzzyansatz zum tragen, der mit Neuronalen Netzen zu einem hierarchischen Modell ausgebaut wird.

1 Einleitung

Biotische Komponenten nehmen bei der Charakterisierung und Bewertung des Agrarraumes eine Schlüsselrolle ein, steht doch das Verhalten von Pflanzen- und Tierarten in einem engen Zusammenhang mit Landnutzungsänderungen und Umwelteinflüssen. So werden vor allem strukturelle (Lebensraumverkleinerung, -zerschneidung und -isolation) und stoffliche (Stoffungleichgewichte) Veränderungen von Lebensräumen für den Rückgang der Artenvielfalt verantwortlich gemacht [2]. Am Verhalten und der Reaktion biotischer Komponenten sind insbesondere auch schleichende Wirkungen ablesbar und das Verhalten bestimmter biotischer

*Institut für Ökosystem- und Prozeßmodellierung D-15474 Müncheberg Eberswalder Str. 84

Komponenten kann als wichtiger Indikator für eine ansonsten noch nicht wahrnehmbare Beeinträchtigung der Umwelt dienen.

Deshalb ist es sehr hilfreich, Auftreten, Mengenfaltung, Verhalten und andere Merkmale von biotischen Komponenten in Abhängigkeit von Veränderungen der realen Umgebung prognostizieren zu können. Prognostizieren bedeutet hier, von schon beobachteten Phänomenen auf bislang unbekannte Konstellationen in Raum und Zeit zu schließen und empirische, in ihren tatsächlichen Konsequenzen nicht überschaubare Eingriffe, zu bewerten. In diesem Sinn sind Modelle für biotische Komponenten unverzichtbare Bestandteile von dynamischen Landschaftsmodellen [1]. Ihre Anwendung kann u.a. auch dazu beitragen, die Entscheidungsfindung im Biotop- und Artenschutz zu unterstützen und Spannungen zwischen Naturschutz und Landnutzung abzubauen.

Für das zu entwickelnde und zu nutzende methodische Instrumentarium ist es dabei erst einmal unerheblich, ob es sich bei den auslösenden Veränderungen um natürliche Einwirkungen (Klima, Wetter, aber auch Veränderungen anderer biotischer Komponenten,...) oder anthropogene Störungen (Landnutzungsänderungen, toxische Belastungen, Stoffein- und -austräge...) handelt.

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit dem Einsatz von Expertenwissen zur Bewertung von Landschaften bzgl. ausgewählter Tierarten. Diese Techniken stammen ursprünglich aus der künstlichen Intelligenz (KI), bewähren sich aber heute auch in vielen praktischen Gebieten. Als Tierarten wurden die Schleiereule, der Kranich, die Großtrappe und die Rotbauchunke ausgewählt, die in einem vom BMFT geförderten Projekt untersucht werden. Diese Tierarten fungieren als Leitarten im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin, die Methoden für eine Modellierung sind auf andere Tierarten und Gebiete ebenso anwendbar. In den zu entwickelnden Modellen wird schwerpunktmäßig untersucht, wie menschliche Eingriffe auf die Qualität der untersuchten Habitate wirken. Auswirkungen menschlicher Eingriffe, wie der Bau von Verkehrswegen, Energietrassen, Siedlungsprojekte, touristische Nutzung, landwirtschaftliche Nutzung usw. sollen als Eingangsgrößen für die Bestimmung der Habitatgüte genutzt werden.

2 Modellierungsstrategie

Als Habitat bezeichnet man in der Ökologie den Ort, an dem Organismen einer Art regelmäßig anzutreffen sind. Damit ist ein Habitat ein hochaggrierter Begriff, der sich aus verschiedenen Faktoren (die auch wieder aggregiert sein können) zusammensetzt. Diese Faktoren bilden eine Hierarchie von Faktoren, an deren Blättern elementare Faktoren stehen, die direkt meßbar bzw. einfach bewertbar sind. So setzt sich das Habitatmodell der Schleiereule aus den aggregierten Faktoren: Fortpflanzungsbedingungen *fortpf*, Nahrungsbedingungen *nahr* und Gefährdungspotential *gefahr* zusammen. Die Fortpflanzungsbedingungen spalten sich in die Qualität des Nistplatzes und die Qualität des Tageseinstandes auf. Im

Tageeinstand verbringt die Schleiereule außerhalb der direkten Bebrütung der Gelege, den Tag. Diese Qualitäten werden wiederum durch die, nun elementaren, Faktoren:

- Schallbelastung am Nistplatz (Einstand)
- Schutz vor Feinden
- Baulicher Zustand des Nistplatzs (Einstandes)

beschrieben. Bemerkenswert ist, daß Schleiereulen, als Kulturfolger, vorwiegend menschliche Bauwerke, wie Kirchen oder Trafohäuschen als Nistplätze nutzen. Mit Hilfe eines Biologen, der als Experte fungiert, wird es möglich, eine komplette Struktur des Habitats der Schleiereule abzuleiten. Eine vereinfachte Struktur wird in Abbildung 1 gezeigt.

Diese Hierarchie bildet den ersten Schritt für die Modellierung eines Habitats. Die hierin enthaltenen Faktoren können auf den unteren Ebenen recht einfach durch Messungen oder quantitative Bewertungen mit einer Qualitätsgröße belegt werden. In der hier vorgestellten Konzeption wird einheitlich von einer Skalierung zwischen $[0, \dots, 1.0]$ ausgegangen. Dabei stehen niedrige Werte für schlechte Bedingungen und hohe Werte für gute Bedingungen. Der durch diese Bewertung eingebrachte subjektive Anteil kann durch entsprechende Untersuchungen vor Ort minimiert werden. So können bevorzugte Jagdgebiete der Schleiereule, Entfernungen usw. z.B. durch telemetrische Untersuchungen ermittelt werden. Wesentlich schwieriger gestaltet sich die 'Verrechnung' der Faktoren zu einer Gesamtbewertung der Habitatgüte.

3 Fuzzyansatz zur Berechnung der Habitatgüte

Unscharfes Wissen wird mittels unscharfer Mengen und darauf aufbauend unscharfer Regeln formalisiert. Unter einer unscharfen Menge A soll im weiteren folgendes verstanden werden:

$$A = \{(x_1, \mu(x_1)), (x_2, \mu(x_2)), \dots, (x_n, \mu(x_n))\} \quad x_i \in G \quad (1)$$

Hierin bezeichnet G die Gesamtheit der Objekte und $\mu(x_i)$ die Zugehörigkeit des Elements x zur unscharfen Menge A . Zum unscharfen Schließen bzw. zum logischen Schließen allgemein, gehören auch mehrdimensionale Entscheidungskonzepte. Ein aus der Literatur bekanntes Entscheidungssystem, das auf Zimmermann

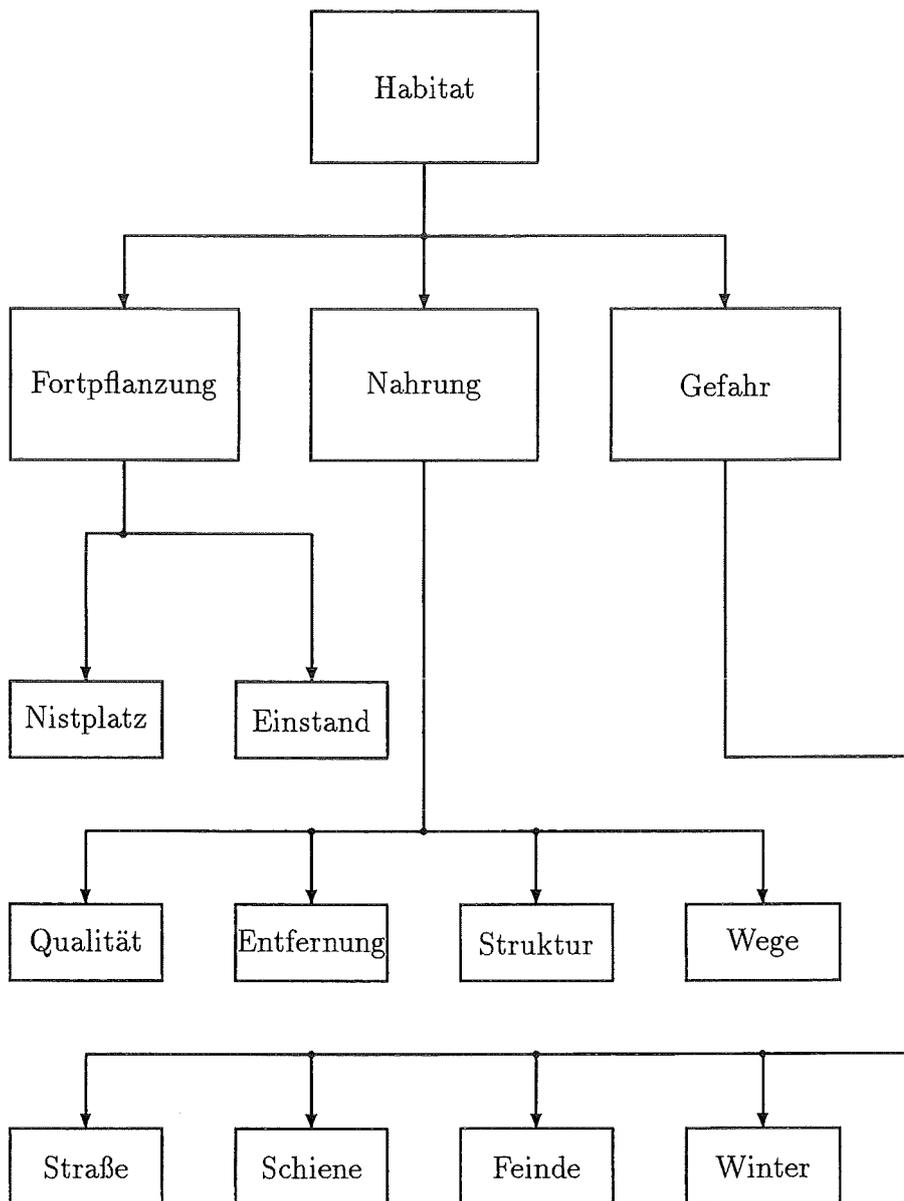


Abbildung 1: Habitat-Hierarchie der Schleiereule

[3] zurückgeht, wird durch folgende Formel beschrieben:

$$\mu(x) = \left[\prod_{i=0}^n \mu_i(x)^{\delta_i} \right]^{1-\gamma} \times \left[1 - \prod_{i=0}^n (1 - \mu_i(x))^{\delta_i} \right]^{\gamma} \quad (2)$$

Hierin bedeuten:

$\mu(x)$:	Zugehörigkeit des Objektes x zur unscharfen Menge A
$\mu_i(x)$:	Zugehörigkeitsfunktion zum Attribut i des Objekts x
δ_i	:	Wichtungen der einzelnen Faktoren
γ	:	Kompensation

Kompensationen eröffnen die Möglichkeit, daß ein besonders guter Faktor einen weniger guten kompensiert. So sind ausgleichende Wirkungen zwischen der Qualität des Futters und der Entfernung vorhanden. Eine sehr gute Nahrungsquelle darf schon etwas weiter weg sein, da die hohe Qualität einen Energieverlust durch die weite Entfernung bis zu einem gewissen Grad ausgleichen kann. Der Grad der Kompensation wird durch γ bestimmt. $\gamma = 0$ bedeutet keine Kompensation (Und-Verknüpfung), $\gamma = 1.0$ bedeutet vollständige Kompensation, d.h. es muß nur ein Faktor vorhanden sein (Oder-Verknüpfung). Der Grad der Kompensation bewegt sich bei der praktischen Modellierung zwischen $[0.1, \dots, 0.8]$, da vollständige Und- genauso selten wie vollständige Oder-Verknüpfungen auftreten. In der Hierarchie des Schleiereulen-Habitats kann beispielsweise das Habitat aus den Faktoren Fortpflanzung, Nahrung und Gefahr berechnet werden. Damit würde sich folgende Formel ergeben:

$$\mu(x) = [\mu_{fortpfl}(x)^{\delta_{fortpfl}} \times \mu_{nahr}(x)^{\delta_{nahr}} \times \mu_{gefah}(x)^{\delta_{gefah}}]^{1-\gamma} \times [1 - (1 - \mu_{fortpfl}(x))^{\delta_{fortpfl}} \times (1 - \mu_{nahr}(x))^{\delta_{nahr}} \times (1 - \mu_{gefah}(x))^{\delta_{gefah}}]^{\gamma} \quad (3)$$

$$\delta_{fortpfl} = 0.4 \quad \delta_{nahr} = 0.3 \quad \delta_{gefah} = 0.3 \quad \gamma = 0.1$$

In (3) wird Expertenwissen über das Habitat der Schleiereule beschrieben. Diese Beschreibung kann aus einfachen IF...THEN...-Regeln gewonnen werden. So könnte z.B. eine erzeugende Regel für ein geeignetes Habitat folgendermaßen aussehen:

```

IF Nahrung = günstig
AND Fortpflanzungsbedingung = mittel
AND Feindsituation = günstig
THEN Habitat = geeignet

```

Hier liegt eine mögliche Berührung zur bekannten Fuzzymodellierung. Dieser Weg soll hier jedoch nicht besprochen werden. Hier geht vielmehr darum, die Modellierungsqualität mit obiger Formel zu untersuchen und gegebenenfalls zu

verbessern. Wichtige Parameter von (2) sind die Wichtungen δ_i und die Kompensation γ . Die Bestimmung dieser Exponenten ist für den Experten eine recht abstrakte Aufgabe. Um diese Schwierigkeiten wenigstens zum Teil zu mildern, wurde ein Fuzzy-Tool unter Nutzung der Programmiersprache SCHEME entwickelt. Das Tool ermöglicht es dem Experten, bestimmte Szenarien durchzuspielen und die Ergebnisse mit seinen Erwartungen zu vergleichen. Interessanterweise ergab sich keine gute Übereinstimmung zwischen dem vom Programm gelieferten Ergebnissen und den Erwartungen des Biologen, obwohl die Wichtungsfaktoren biologisch sinnvoll gewählt waren. Die Unzufriedenheit des Experten gründete sich auf eine zu geringe ausgleichende Wirkung des Fuzzymodells. Es wurde gefordert, daß das Zusammentreffen mehrerer guter (wenig von 1.0 abweichender) Faktoren, zu einer sehr guten Bewertung des Habitats führen soll, und nicht zu einer mittelmäßigen, wie im Fuzzymodell. Dieser Widerspruch wurde durch Einführung einer Heuristik beseitigt, indem das Fuzzyergebnis mittels einer sigmoiden Funktion verzerrt wurde.

$$y = \frac{1}{1 + e^{-10 \times (\mu(x) - 0.5)}} \quad (4)$$

Diese sigmoide Funktion führt zu der erwünschten Streckung wichtiger Übergangsbereiche zwischen einem guten und einem schlechten Habitat. Damit wird der Einfluß sich ändernder Größen gut sichtbar. Kleine Änderungen einzelner Größen spielen eine vergleichsweise geringe Rolle. Verändern sich aber mehrere Größen eventuell auch nur um kleine Beträge, so sind die Änderungen im Ergebnis oft gravierend. Sehr gut sichtbar war das Verhalten, als im Faktor Gefahr die Werte für den Feindbestand und die Deckung variiert wurden. Eine Variation des Feindbestandes allein zeigte kaum Wirkung, als aber dazu die Deckung noch verschlechtert wurde, ergab sich eine drastische Verschlechterung des Faktors Gefahr. Dieses Verhalten war sehr einsichtig und entsprach der Erfahrung des Biologen. In den folgenden Abbildungen soll die Wirkung der Heuristik veranschaulicht werden.

Abbildung 2 beschreibt ein vom Experten vorgeschlagenes Fuzzymodell. In der folgenden Abbildung 3 wird dieses Modell unter Wirkung der Heuristik gezeigt.

Die Modellierung mit Hilfe des Fuzzyansatzes hat dort ihre Stärken, wo der Experte die Parameter zuverlässig aus seinem Erfahrungsschatz ableiten kann. Liegen aber nur Beispiele von beurteilbaren Habitaten vor, so ist dieser Ansatz überfordert. Trotzdem bildet das Fuzzymodell einen wichtigen Schritt in Richtung zuverlässiger Habitatmodelle, da es damit möglich ist, das Zusammenspiel der einzelnen Faktoren am Modell zu simulieren. Es können die Wirksamkeit einzelner Faktoren, wie auch gegenseitige Abhängigkeiten studiert werden. Abweichungen zwischen der Erfahrung des Experten und dem Modell können in dieser Phase der Untersuchung ausgeglichen werden bzw. sollten auch hier schon den Experten zu einer Überprüfung seines Wissens anregen. Da in diesen Ansatz aber noch keine experimentellen Daten einfließen, sollte letztere Möglichkeit nicht überbewertet

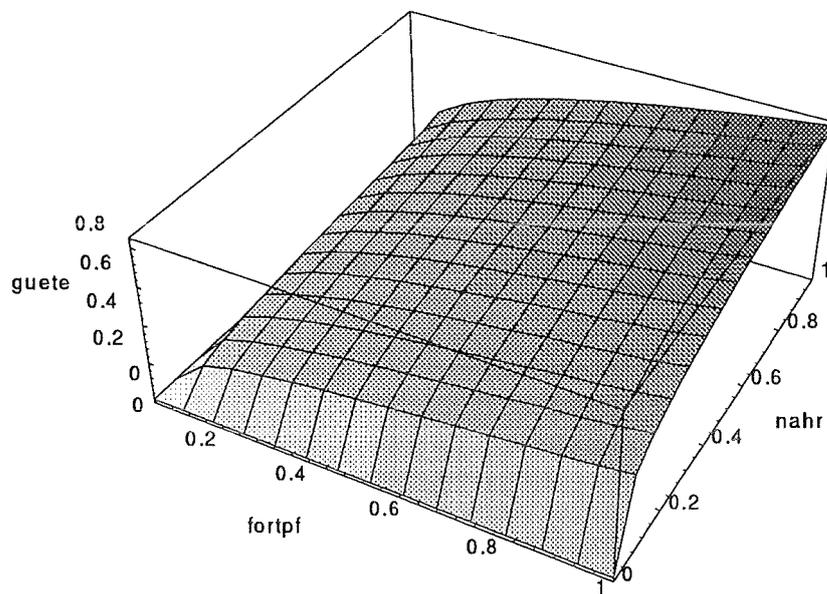


Abbildung 2: Fuzzymodell mit Gefahr = 0.5

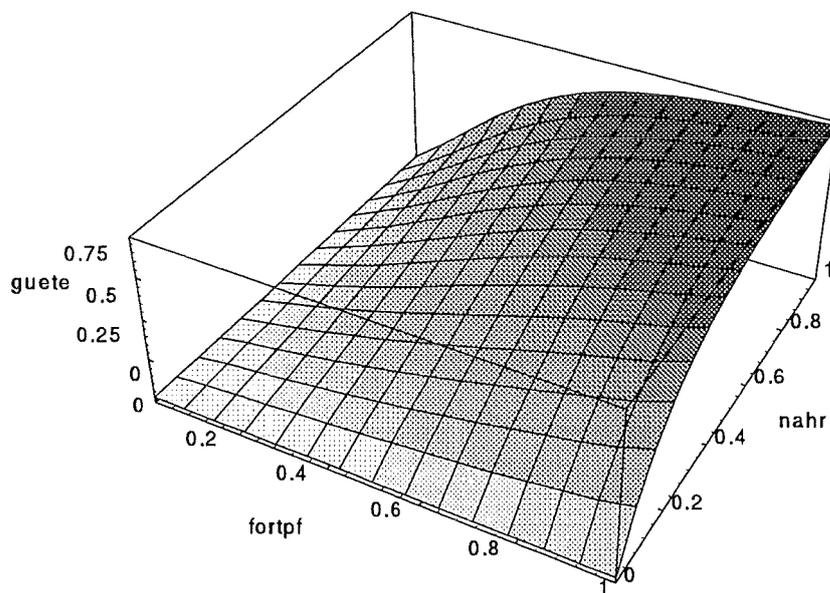


Abbildung 3: Fuzzymodell mit Heuristik, Gefahr = 0.5

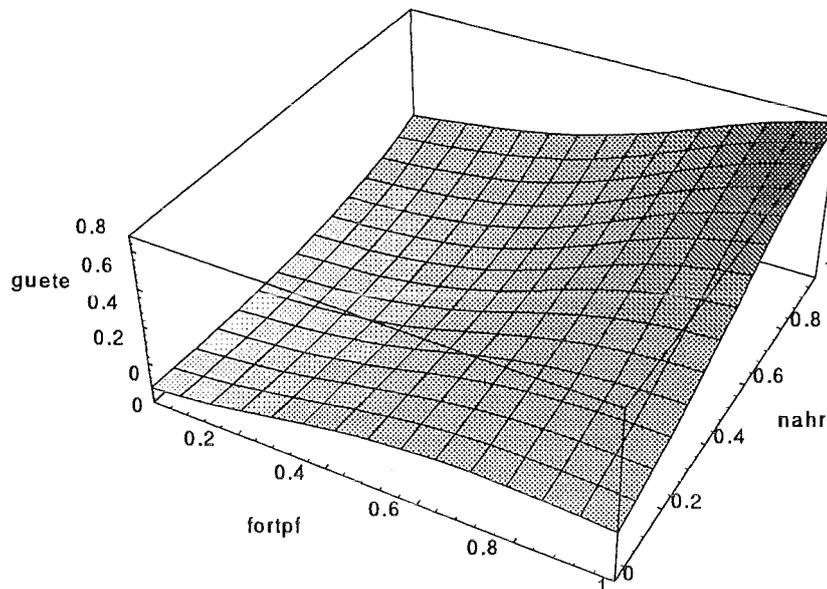


Abbildung 4: Neuronales Netz, Gefahr = 0.5

werden. Neue, aus Beobachtungen gewonnene Daten sollten bei diesen Modellen in der nächsten Stufe mit einfließen. Hier wird ein Übergang zu Neuronalen Netzen vorgenommen, da deren Fähigkeit zum Lernen und Generalisieren eine wichtige Voraussetzung zur Modellierung mit Beobachtungsdaten bildet. Grundgedanke des Einsatzes Neuronaler Netze bildet der Versuch, aufbauend auf dem Fuzzymodell, eine erste Lernfolge aus diesem Wissen abzuleiten. Dieses Herangehen hat den Vorteil, daß die im Fuzzymodell gewonnen Beziehungen weiter genutzt werden können, aber auch die Ergänzung durch aktuelle Daten aus Beobachtungen leicht möglich ist. Mittels einiger Umformungen kann aus dem Fuzzymodell recht einfach eine Lernmenge für ein Neuronales Netz generiert werden. Leider ist diese Umformung nicht vollständig automatisierbar, da der Experte mit den Lernergebnissen nicht in jeder Hinsicht konform geht. Die erzeugten Lernmuster werden mit der Hand auf Unstimmigkeiten untersucht und gegebenenfalls weiter spezifiziert. Dazu wurden spezielle Tools entworfen, die das Lernergebnis graphisch darstellen und so einer Beurteilung durch den Experten zugänglich machen.

Das in Abbildung 4 dargesellte Neuronale Netz zeigt ein aus dem Fuzzymodell abgeleitetes Netz ohne Einbeziehung weiterer experimenteller Daten. Es ist damit Ausgangspunkt für die weitere Modellierung der Habitatstruktur. Zusammenfassend kann eine Iterationsstufe für die Modellierung wie in Abbildung 5 gezeigt formalisiert werden. Die Modellierung durchläuft entsprechend mehrere Iterationsstufen, wobei aus jeder Stufe Forderungen nach konkretisierter experimenteller Arbeit für den Biologen ableitbar sind. Dadurch entsteht eine Rückkopplung zum Biologen und letztlich auch zum biologischen Fachwissen.

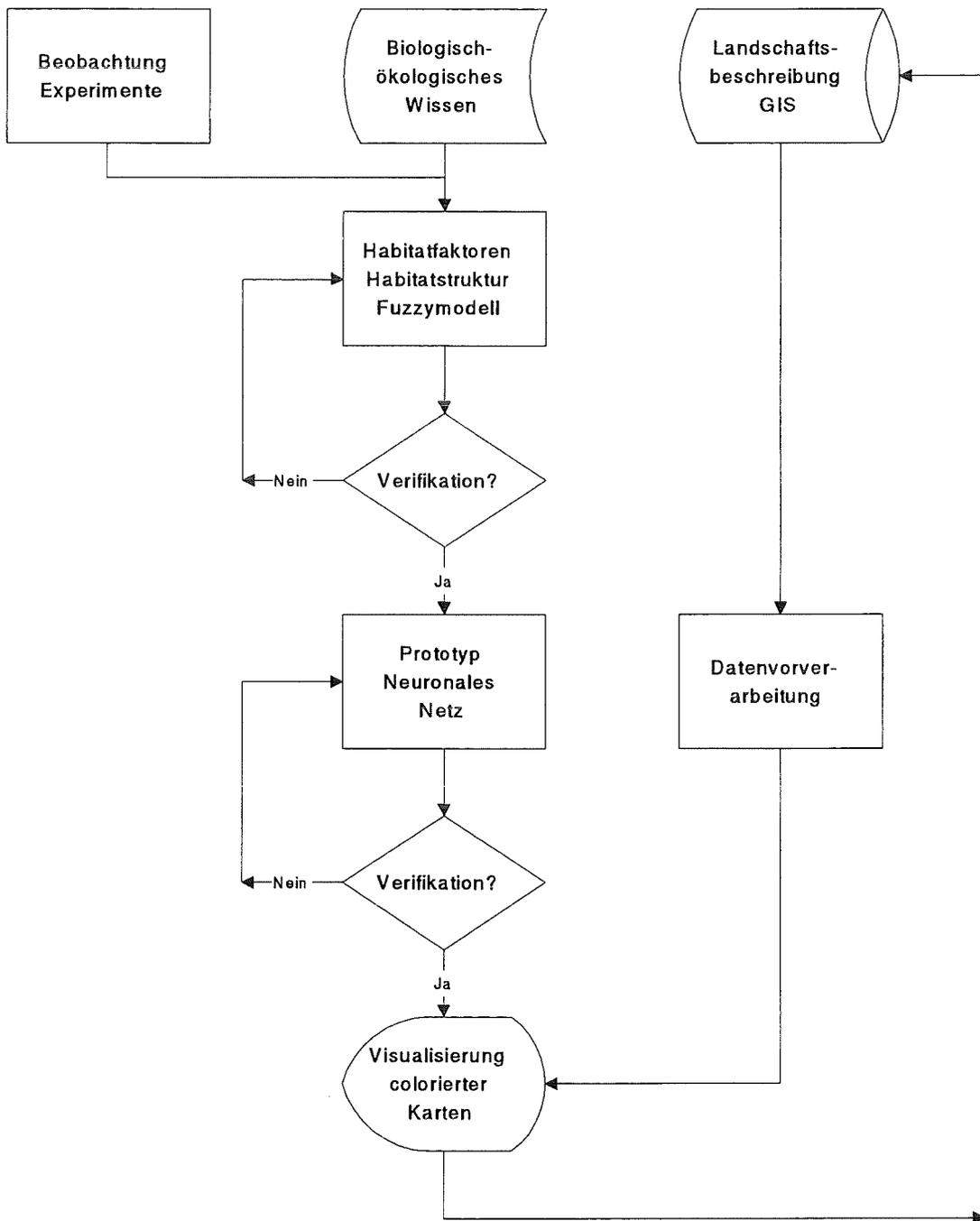


Abbildung 5: Iterationsschleife zu einem Modellschritt

Nach Aufbau einer Modellierungsstufe mit Neuronalen Netzen erfolgt eine punktweise Berechnung des flächenhaften Areals. Bestimmte Untersuchungsgebiete im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin werden dazu in einem geographischen Informationssystem erfaßt und damit einer Bewertung durch das Modell zugänglich gemacht. Damit wird es möglich, Karten des Untersuchungsgebietes bzgl. seiner Habitateigenschaften zu erzeugen. Diese Karten belegen anschaulich die Wirkung von Veränderungen in der Landnutzung bzgl. der zu bewertenden Tierarten. Die erzeugten Karten werden nach einer kritischen Bewertung des Fachexperten dann im GIS gespeichert. Damit fungiert das GIS nicht nur als Datenquelle, sondern dient gleichzeitig auch zur Speicherung der erzeugten Karten.

Es ist immer zu beachten, daß unterschiedliche Tierarten auch unterschiedliche Anforderungen an ein Habitat stellen. So hat der Kranich einen anderen Flächenanspruch als die Schleiereule, die sich aber beide wieder sehr von den Ansprüchen der Rotbauchunke unterscheiden. Diese Unterschiede wirken auf die Modellierung, da je Tierart unterschiedliche räumliche und auch zeitliche Auflösungen erforderlich sind.

4 Schluß

Die hier vorgeschlagene Modellierungsstrategie der Habitateigenschaften ist nur über eine enge Zusammenarbeit zwischen Informatiker und Biologen möglich. Das Expertenwissen wird dabei nicht, wie traditionell üblich, in einem Expertensystem erfaßt, sondern es wird versucht, das Problem über eine kombinierte Fuzzy/Neuro-Strategie anzugehen. Diese Herangehensweise hat den Vorteil, daß das Ergebnis in Form eines Algorithmus vorliegt (z.B. als C-Quellcode durch Neural Works erzeugt), der entsprechend schnell auf große Flächen angewendet werden kann. Nur mit Hilfe des compilierten C-Codes ist es möglich, die Laufzeit bei der Modellrechnung in erträglichen Grenzen (ein Szenarium in wenigen Stunden) zu halten. Weiterhin ist der Übergang zu Neuronalen Netzen für die Verfeinerung der Modellierung äußerst vorteilhaft, da die Lernfähigkeit der Netze eine Integration aktueller Untersuchungsergebnisse gut unterstützt. Abschließend sei bemerkt, daß eine Nutzung dieser Modellierungsstrategie nicht nur auf die Modellierung von Habitatgütern beschränkt ist. Die hier beschriebene Modellierungsstrategie ist, durch die Möglichkeit der Wichtung und Kompensation einzelner Faktoren, gleichermaßen für die Bewertung von abiotischen, biotischen und komplexeren Landschaftsstrukturen geeignet. Wichtig ist, daß diese Strukturen bestimmenden Faktoren nicht losgelöst, sondern immer im Wechselspiel von Wichtung und Kompensation betrachtet werden.

Danksagung

Wir möchten uns ganz herzlich für die gute Zusammenarbeit und die fachliche Beratung bei Frau Dr. Wuntke , HUB, Institut für Biologie, Projektgruppe Naturschutz bedanken. Ohne sie wäre die Modellierung des Schleiereulenhabitats nicht möglich gewesen.

Diese Arbeit wurde gefördert vom BMFT, Förderkennzeichen Nr.: 0339539, vom BML und vom MELF des Landes Brandenburg.

Literatur

- [1] Lutze, G., A. Schultz, J. Kiesel: Modellgestützte Landschaftsanalyse in der Agrarlandschaft Chorin. Geowissenschaften, 12 (1994), S. 274-281
- [2] Kaule, G.: Biotop- und Artenschutz. Eugen Ulmer, Stuttgart, 1991
- [3] Traeger, D.: Einführung in die Fuzzytheorie. B.G. Teubner, Stuttgart, 1994

Modellierung der Verschmutzung für das Regionalplanungsmodell RegioPlan⁺

Dipl. Inf. Norbert Grebe, Universität Passau, 94030 Passau

1 Modellgestützte Regionalplanung mit RegioPlan⁺

RegioPlan⁺ ist ein Modell, das im Rahmen eines FORWISS¹-Projekts für den Einsatz der Simulation in der Regionalplanung entwickelt wird. Es unterstützt die Entscheidungsträger bei der Analyse des realen Systems einer Region und bei der Entwicklung und Bewertung von planerischen Maßnahmen. Darüber hinaus werden Einheimische und Besucher durch das Experimentieren am Modell für die Problematik des landschaftlichen Gebiets sensibilisiert, indem sie verschiedene Szenarien am Rechner durchführen können.

Die Regionalplanung hat die Aufgabe, durch geeignete Maßnahmen die Entwicklung einer Region zu fördern. Dies kann in vielen ländlichen Regionen über den Ausbau des Fremdenverkehrs geschehen, der besonders in strukturschwachen Gebieten ein bedeutender Wirtschaftssektor mit vielen Erwerbsmöglichkeiten für die regionale Bevölkerung sein kann. Damit trägt der Tourismus zu einer gesunden Struktur bei, die die Abwanderung aufzuhalten hilft.

Allerdings muß dafür gesorgt werden, daß dieser Ausbau in Bahnen gelenkt wird, die sowohl für die Einheimischen als auch für die Gäste erstrebenswert sind, denn vielerorts hat der Fremdenverkehr, insbesondere in Form des Massentourismus, bereits zu unerwünschten Ergebnissen geführt.

Viele Urlaubsregionen leiden unter mehr oder weniger beeinträchtigten Naturlandschaften, durch bedenkenlose Bautätigkeit verunstalteten Ortsbildern und vom Verkehr verstopften Straßen.

Doch insbesondere die intakte Natur- und Kulturlandschaft stellt das Kapital eines Tourismusgebiets dar, so daß sich die Aufgabe stellt, wie die Region sich als Lebens-, Wirtschafts-, Erholungs- und Naturraum langfristig erhalten läßt.

1. Bayerisches Forschungszentrum für Wissensbasierte Systeme Erlangen-München-Passau

Natürlich muß bei der Untersuchung des Fremdenverkehrs beachtet werden, daß er als Wirtschaftszweig Teil eines komplexen Wirkungsgefüges ist, zu dem auch wesentlich die einheimische Bevölkerung, das regionale Gewerbe, die Land- und Forstwirtschaft sowie Handel- und Dienstleistungsbetriebe mit deren Arbeitsplatzangeboten gehören. Ein ganzheitlicher Ansatz bei der Regionalplanung ist also erforderlich.

Sinn aller Planung ist das Erreichen von Zielen. In der Regionalplanung seien exemplarisch einige dieser Entwicklungsziele genannt:

- Förderung eines naturverträglichen Tourismus.
- Verbesserung der Lebensqualität für Einheimische.
- Schaffung von Nebenerwerbsmöglichkeiten für Landwirte (Urlaub / Seminare auf dem Bauernhof).
- Erhaltung der Kultur- und Naturlandschaft.
- Ausbau der öffentlichen Infrastruktur.
- Sinnvolle Verwendung der öffentlichen Mittel und Subventionen.
- Förderung der regionalen Wirtschaftskraft.
- Ansiedlung von Gewerbebetrieben und Schaffung von Arbeitsplätzen.
- Verbesserung der Verkehrssituation (z.B. durch verkehrsfreie Zonen).
- Verbesserung der Umweltqualität.
- Erhaltung einer intakten Sozialstruktur.

Viele dieser Ziele stehen in Konkurrenz zueinander, da zum Beispiel die Ansiedlung von Gewerbebetrieben zunehmenden Verkehr und Umweltbelastung nach sich zieht. Hier stellt sich dem Planer die Aufgabe, eine Kompromiß zu finden bzw. alternative Lösungen zu erarbeiten.

Wie kann ein Simulationsmodell den Regionalplaner unterstützen?

Bei einem landschaftlichen Gebiet handelt es sich um ein sehr komplexes vernetztes System mit interagierenden Komponenten, so daß die Auswirkungen von planerischen Maßnahmen nicht immer in ihrer Gesamtheit überschaubar sind. Die vielfachen direkten und indirekten Rückkopplungen sowie zeitverzögerte Wirkungen machen dies zu einer schwierigen Aufgabe.

Hier bietet sich die Simulation als ein Werkzeug für den Regionalplaner an. Er kann am Simulationsmodell mit Hilfe einer benutzerfreundlichen graphischen Oberfläche seine Entscheidungen entwickeln und die Konsequenzen von Maßnahmen überprüfen. Die Ergebnisse von Simulationsläufen dienen ihm als Argumentationsunterstützung. Außerdem vertieft die Arbeit mit dem Modell die Kenntnis über das reale System.

Darüber hinaus kann man das Simulationsmodell auch den Entscheidungsbetroffenen zur Verfügung stellen, beispielsweise in Besucher- oder Informationszentren. Einheimische und Besucher können über das »Durchspielen« der angebotenen Szenarien für die Problematik ihrer Region sensibilisiert werden.

Zu den Standardszenarien gehören unter anderem:

- Investitionen in Infrastrukturmaßnahmen
- Aufbau neuer Verkehrskonzepte
- Beschränkung der Besucherzahl
- Entwickeln von Werbestrategien für die Region
- Änderungen von Flächennutzungsplänen
- Konsequenzen von Nachfrageschwankungen, Subventionen usw.

Weiterhin schulen der Modellaufbau und die Beschäftigung mit dem Simulationsmodell einer Region das vernetzte Denken und Planen, das angesichts der Komplexität der realen Lebenswelt unerlässlich ist und aus den gewohnten linearen Denkstrukturen herausführt.

2 Die Struktur des Modells

Um das komplexe System einer Region verständlich im Modell abzubilden, setzt sich RegioPlan⁺ aus vielen überschaubaren, selbständig lauffähigen Subkomponenten zusammen, die in bis zu vier Hierarchieebenen miteinander verbunden sind. Dabei ist mehrmals das Klassenkonzept des Simulators SIMPLEX II angewandt worden.

RegioPlan⁺ ist durch Parametervariation auf beliebige Regionen übertragbar. Hierzu sind die charakteristischen Größen der jeweiligen Region abzufragen und in das Modell einzugeben. Da der Wert einer Modellaussage mit der Genauigkeit der Eingangsdaten steigt, sind für ein Regionalmodell, das die Entscheidungsträger in der Regionalplanung unterstützen soll, sehr exakte Datenerhebungen notwendig. Diese können mit Fragebögen vor Ort und bei Statistischen Ämtern durchgeführt werden. Ein auf diese Art entstandenes Simulationsmodell läßt sich auf der Planungsebene als Prognosemodell verwenden.

Die Struktur des Modells RegioPlan⁺, wie sie Abb. 1 zeigt, bleibt bei der Übertragung unverändert. Das Gesamtmodell besteht aus 11 Subkomponenten, die ihrerseits weiter untergliedert sind. Diese Hierarchiebildung geht bis zu 4 Ebenen tief. Ein Pfeil zwischen zwei Komponenten bedeutet, daß der Baustein am Pfeilende ein oder mehrere Modellgrößen vom Baustein am Pfeilursprung übermittelt bekommt. So ergibt sich das stark vernetzte Modell der realen Region.

Im Zentrum der Abbildung steht die Komponente »Produktivkräfte«, die die Wirtschaft der Region modelliert. Sie ist in die fünf Wirtschaftsbereiche Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Produzierendes Gewerbe, Handel und Dienstleistung sowie Touristik unterteilt. Hier wird die durch Produktion verursachte Verschmutzung ermittelt.

Der Baustein wird von einem Dreieck der Komponenten eingerahmt, die die Berechnung der Produktionsfaktoren Kapital, Arbeitskraft und Fläche vornehmen: Im Baustein »Investition in Produktivkräfte« finden Investitionsentscheidungen statt, im Modul »Bevölkerung« werden die zur Verfügung stehenden Arbeitskräfte ermittelt und die Komponente »Fläche« stellt Investitionsfläche bereit.

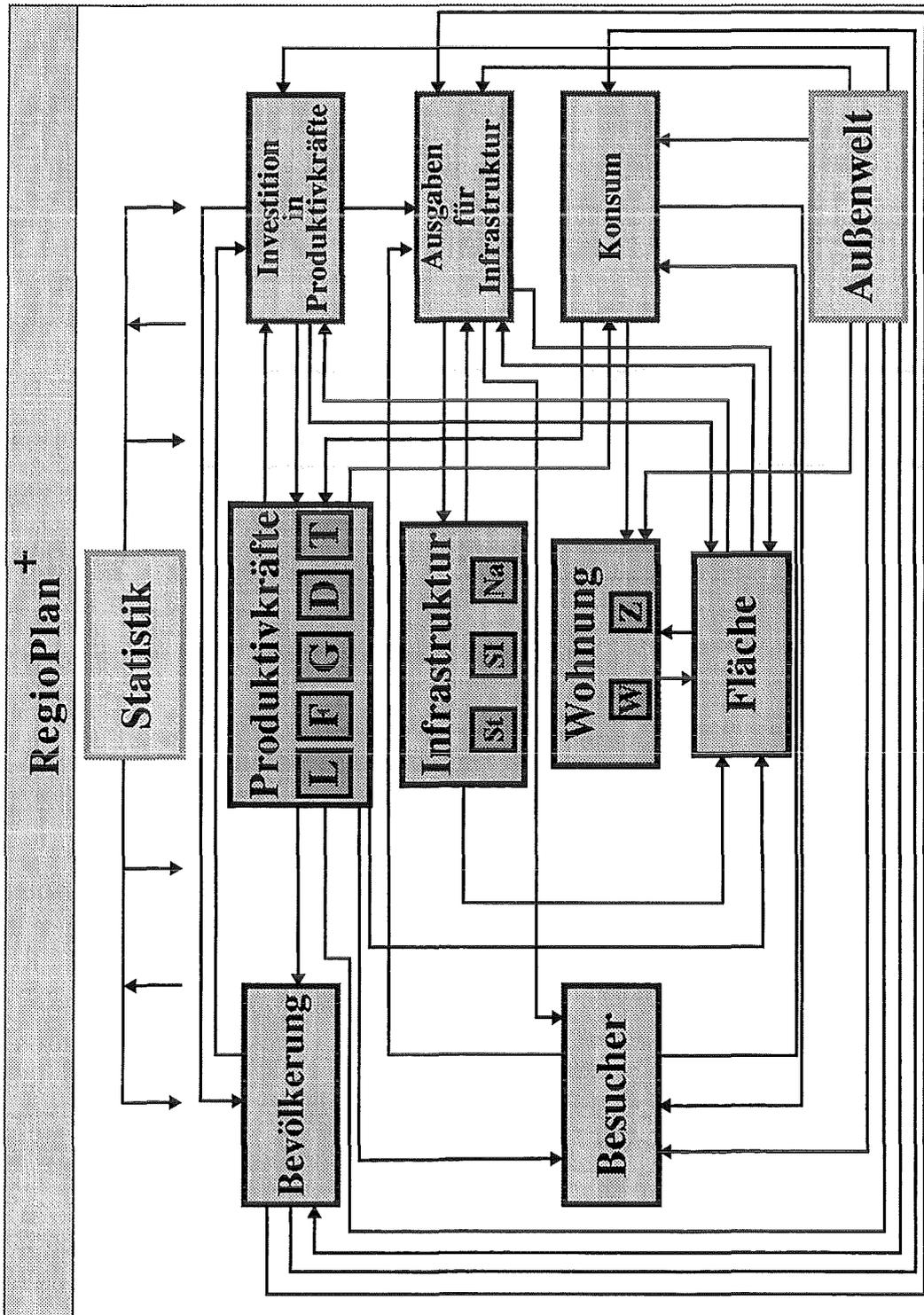


Abb. 1: Die Struktur von RegioPlan⁺

Die Berechnung der Nachfrage nach Produkten und Dienstleistungen der regionalen Wirtschaft findet im Baustein »Konsum« statt. Natürlich tragen auch die in der Komponente »Besucher« modellierten Gästezahlen der Region zur Gesamtnachfrage bei.

Die Einrichtungen der öffentlichen Infrastruktur werden in der Komponente »Infrastruktur« modelliert. Analog zur Wirtschaft finden Investitionsentscheidungen der öffentlichen Hand im Baustein »Ausgaben für Infrastruktur« statt. Die Infrastruktur ist weiter unterteilt in die Bereiche Straßen, Naturschutzeinrichtungen und sonstige Infrastruktur.

Die Siedlungsfläche für Erst- und Zweitwohnungen und deren jeweiliger Bestand sowie die von Privathaushalten verursachte Verschmutzung wird im Modul »Wohnungen« berechnet. Die Komponente »Statistik« dient der Summation von Einzelgrößen des Modells. Hier wurde in einer ersten Version des Modells die Gesamtverschmutzung ermittelt, die jetzt ersetzt ist durch die drei Verschmutzungsarten Abfall, Abwasser und Abluft.

Den vielfältigen Einfluß auf die Region von außen modelliert der Baustein »Außenwelt«.

Bei der Abbildung des stark vernetzten Systems einer Region entsteht notwendigerweise ein sehr komplexes Modell. Um dem Nutzer die Arbeit mit dem Simulationsmodell und dessen Wirkungsgefüge zu erleichtern, sind daher bei der Entwicklung von RegioPlan⁺ zwei Punkte besonders berücksichtigt worden:

- ❑ Das Modell ist in sinnvoller Weise in überschaubare, handhabbare Subkomponenten aufgeteilt, die selbständig lauffähig, und damit einzeln testbar sind. Leitgedanke ist hierbei die Strukturähnlichkeit zwischen realem System und Modell. Diese Unterteilung kann in mehreren Hierarchieebenen geschehen.
- ❑ Subkomponenten, die die prinzipiell gleiche Dynamik mit unterschiedlichen Parametern besitzen, sind durch Ausprägungen ein und derselben Klasse von Komponenten realisiert. Dies hat für den Anwender den Vorteil, daß er das gleiche Dynamikmuster an verschiedenen Stellen im Modell wiederentdeckt. Einmal Verstandenes ist auf diese Weise mehrfach verwendbar.

Das Simulationssystem SIMPLEX II mit seiner Beschreibungssprache MDL unterstützt die Einhaltung dieser beiden Punkte bei der Implementierung des Modells. Darüber hinaus ermöglicht das System die einfache Durchführung von Simulationsstudien und die Darstellung der Ergebnisse (siehe [5]).

3 Integration des Verschmutzungsmodells

Da RegioPlan⁺ besonders für den Einsatz in ländlichen Regionen mit bedeutendem Fremdenverkehr vorgesehen ist, spielt der Umweltzustand eine wichtige Rolle bei der Ermittlung der Gesamtattraktivität der Region auf Besucher und Wohnbevölkerung. In diese Gesamtattraktivität geht auch die »Attraktivität aus Verschmutzung« ein, die sich ihrerseits aus den drei Teilattraktivitäten aus Abfall, Abwasser bzw. Abluft zusammensetzt.

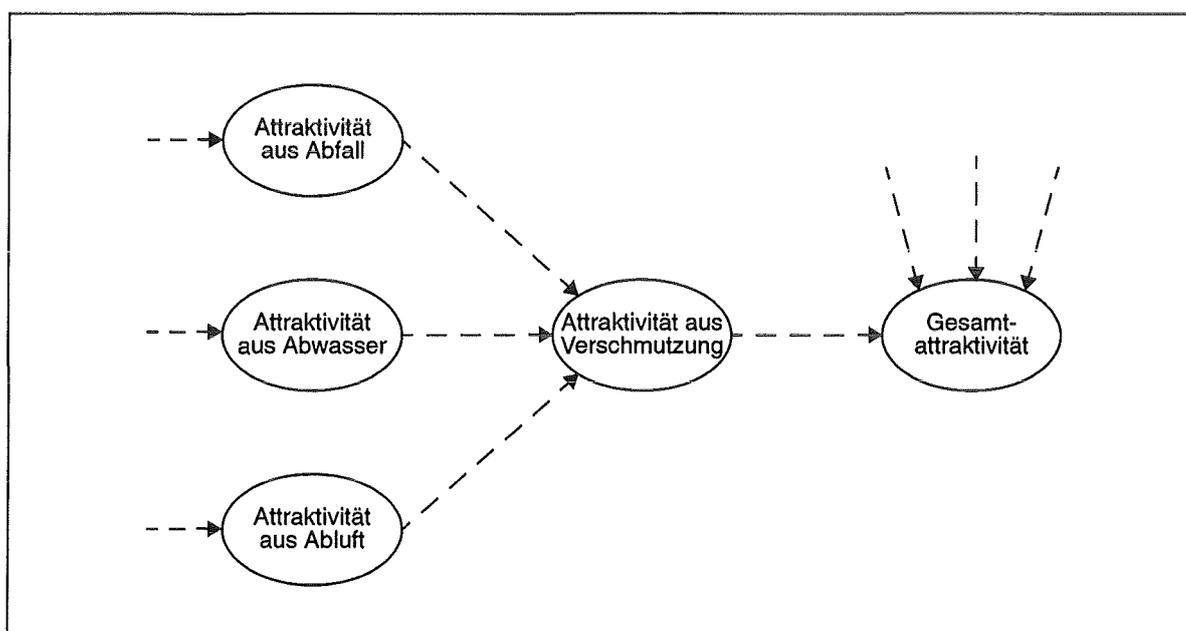


Abb. 2: Integration der Attraktivität aus Verschmutzung

Für die Berechnung der Teilattraktivitäten wird auf Basiswerte zurückgegriffen, z.B. auf den der Abfallrate, gemessen in Kilogramm pro Einwohner und Jahr. Die Basiswerte entsprechen einer durchschnittlichen Attraktivität. In Abhängigkeit vom jeweiligen Basiswert nehmen die Teilattraktivitäten Werte zwischen Null (schlecht) und Zwei (gut) an.

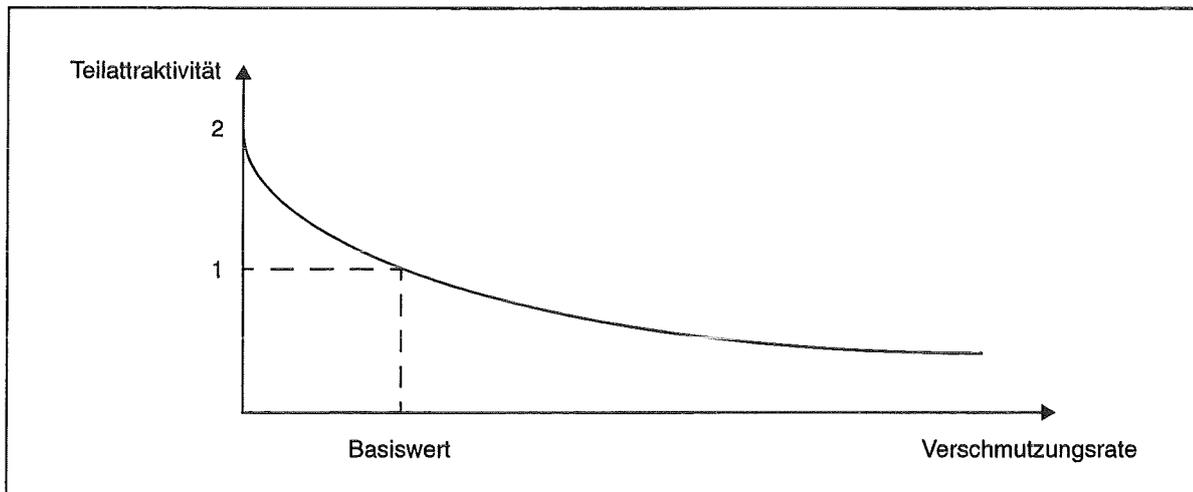


Abb. 3: Berechnung der Teilattraktivitäten

Als Verursacher von Abwasser und Abfall treten die fünf Wirtschaftsbereiche und die Wohnungen auf. Abluft wird zusätzlich durch den Verkehr erzeugt, der sich seinerseits aus Bevölkerungs-, Besucher-, Wirtschafts- und Durchgangsverkehr zusammensetzt. Die entsprechende Summenbildung erfolgt in der Komponente »Statistik«.

4 Einsatz des erweiterten Regionalplanungsmodells

Nachdem RegioPlan⁺ um das verfeinerte Verschmutzungsmodell erweitert und durch Vergleich mit realen Daten einer Bezugsregion validiert werden konnte, ist nun der Einsatz detaillierterer Szenarios im Bereich der Umweltauswirkungen möglich. Bisher ließen sich nur allgemeine Angaben zur Gesamtverschmutzungsentwicklung machen; nach der Erweiterung ist eine Differenzierung nach Teilverschmutzungen und -attraktivitäten möglich. Zu untersuchende Szenarien betreffen beispielsweise die Bereiche »strengere Umweltauflagen für die Wirtschaft«, »Veränderungen der jährlichen Fahrleistung des Individualverkehrs« oder »Minimierung des privaten Restmüllaufkommens«.

5 Literatur

- 1) Dörner, D.:
Die Logik des Mißlingens
Rowohlt Verlag Hamburg 1990
- 2) Grebe, Norbert:
Das übertragbare Regionalplanungsmodell RegioPlan⁺
in: A. Sydow (Hrsg.): 8. ASIM Symposium in Berlin
Vieweg Verlag 1993, ISBN 3-528-06555-9
- 3) Grebe, Norbert:
Hierarchischer Modellaufbau und Anwendung des Klassenkonzepts am Beispiel von RegioPlan⁺
3. Treffen des Arbeitskreises Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in
Umweltanwendungen
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 1993
ISSN 0303-4003
- 4) Kourtoglou, Wassilios:
Konzeption und Implementierung eines Verkehrs- und Verschmutzungsmodells zur Integration in ein Regionalplanungsmodell
Diplomarbeit am Lehrstuhl für Operations Research und Systemtheorie,
Universität Passau 1994
- 5) Meadows, D.:
Die neuen Grenzen des Wachstums - WORLD II
1991
- 6) Schmidt, B.:
The Structure of the Simulation System SIMPLEX II
Simulation Environments, SCS Publication 1988

Szenariotechnik und Informationsvisualisierung

Michael H. Ruge
Siemens AG

Bei der Szenariotechnik nach v. Reibnitz handelt es sich um eine Prognosetechnik, die von der Gegenwart oder einer vorgegebenen Situation ausgeht und versucht, Schritt für Schritt aufzuzeigen, wie sich eine künftige Situation als logische Folge von Ereignissen entwickeln könnte. In einem zwei- bis viertägigem Workshop entwickeln 10-20 Teilnehmer Schritt für Schritt Trend- und Extremszenarien, die aufzeigen sollen, wie sich eine künftige Situation als logische Folge von Ereignissen entwickeln könnte. Dabei versteht man unter einem Szenario sowohl die Beschreibung einer möglichen zukünftigen Situation als auch das Aufzeigen des Entwicklungsverlaufs, der zu dieser zukünftigen Situation führt.

Ihr Vorteil gegenüber anderen, meist auf Regressionsmodellen basierten Ansätzen liegt darin begründet, daß verschiedene Aspekte eines Problems gleichzeitig berücksichtigt werden können. Sie eignet sich daher besonders gut für die Entwicklung techno-ökonomischer und sozio-technischer Alternativmodelle, vor allem auch für solche, die nicht quantifizierbare, also qualitative Faktoren beinhalten. Daher ermöglicht sie die Integration sogenannter „weicher“ Faktoren aus dem gesellschaftlichen und ökologischen Umfeld in ein heuristisches Gesamtmodell.

Das Ziel der Szenariotechnik ist vor allem, jene kritischen Punkte aufzuzeigen, an denen alternative Entwicklungen eintreten können, die Entscheidungen erforderlich machen, und hierfür einen Maßnahmenkatalog zu erarbeiten. Die Folgen möglicher Entscheidungen werden als alternative Optionen dargestellt, wobei man sich im allgemeinen auf die Verfolgung der relevanten Alternativen beschränkt. Dazu entwickeln die Workshopteilnehmer Extremszenarien und optional nach einer Störereignisanalyse Trendszenarien, die durch diese Extremszenarien "begrenzt" sind und somit charakterisiert werden können.

Der Szenariotechnik liegt meist ein zuvor abgesteckter zeitlicher Rahmen zugrunde. Szenarien können auf einer Kombination historischer Ereignisse aufgebaut werden - so wie etwa Romanschriftsteller eine Handlung erfinden - oder sie können sich auf natürliche Weise beim Spielen einer Rolle oder bei der Durchführung eines Planspiels ergeben. (Jede Folge von Zügen in einem strategischen Managementspiel kann als ein Szenarium aufgefaßt werden.)

Die Szenariotechnik läßt sich durch Teile aus der Sensitivitätsanalyse nach Vester unterstützen. Diese ist eine Bewertungsmethode, die optimale Lösungen auf eine vorgegebene Fragestellung beinhaltet. Beide Methoden ergänzen sich in idealer Weise bei der Entwicklung von Zukunftsszenarien, die sich wiederum einer ersten mathematischen Formalisierung, z.B. mittels einer Qualitativen Kausalanalyse, unterziehen lassen.

Sensitivität bezeichnet in der Physiologie die besonders ausgeprägte Fähigkeit, Sinnesreize zu empfinden und wahrzunehmen. Die Betonung liegt auf der bewußten Wahrnehmung von Signalen zu einer entsprechenden geistigen Weiterverarbeitung. Die Sensitivitätsanalyse bezieht sich daher auf verschiedene Formen von Modellen zur Ermittlung von zulässigen bzw. optimalen Lösungen für eine vorgegebene Problemstellung und dient der Prüfung der Empfindlichkeit einer Lösung auf Änderungen der Umgebungsbedingungen.

Im Rahmen einer Szenarioworkshopreihe eignet sich insbesondere das aus der Sensitivitätsanalyse stammende Verfahren der "Einflußindexanalyse", das nach seiner mathematischen Auswertung die im Szenarioworkshop gewonnenen Variablen nach **aktiv** ./ **reaktiv** und **kritisch** ./ **puffernd** klassifiziert. Erweist sich z.B. eine Variable als kritisch, so kann man davon ausgehen, daß bereits kleine Veränderungen der Variablen eine schwer vorhersagbare Wirkung auf das betrachtete System ausüben.

Um die Ergebnisse der Szenariotechnik und Sensitivitätsanalyse formal besser auswerten zu können, wird ein Verfahren der Kontextanalyse eingesetzt. Durch eine approximative Einbettung formaler Kontexte in dreidimensionalen Informationsräumen ist es möglich, die in der Szenariotechnik und Sensitivitätsanalyse erarbeiteten Informationen anschaulich und intuitiv zu visualisieren. Damit werden das Ergebnis der Einflußindexanalyse und später die resultierenden Szenarien einer einfachen Erschließung und Weiterverarbeitung durch das Team zugänglich gemacht. Die Szenarien sowie die Variablen können auf ihre Konsistenz hin untersucht und gegebenenfalls modifiziert werden.

Diese Aussagen helfen, sensitive Stellen und Störanfälligkeiten im System zu ermitteln und ein erstes Kausalmodell zu erstellen. Dieses kann dann einer detaillierteren Betrachtung in einer Qualitativen Kausalanalyse unterzogen werden.

Literatur

Führung, T., K. Jakoby, M. Michelis and J. Panyr (1994). *Kontextgestaltung: Eine Metapher zur Visualisierung von und Interaktion mit komplexen Wissensbeständen*. in: Schriften zur Informationswissenschaft (16): Mehrwert von Information - Professionalisierung der Informationsarbeit. Proceedings des 4. Internationalen Symposiums für Informationswissenschaft (ISI '94).

Lauxmann, T. (1993). *Technikbewertung im Unternehmen: Aufgaben - Ansätze - Erfahrungen*, in: Technikbewertung - Eine interdisziplinäre Aufgabe, M. F. Jische and Wachlin, K., Author. Forum Clausthal: Clausthal. pp. 40-59.

Oyeleye, O. O. and M. A. Kramer (1989). *Guidelines for Developing Signed Directed Graphs*. Laboratory for Intelligent Systems in Process Engineering, Dept. of Chem. Engineering, M.I.T.

Vester, F. (1988). *The Biocybernetic Approach as a Basis for Planning Our Environment*. Systems Practice, 1988. 1(4): pp. 399-413.

Reibnitz, U. v. (1987). *Szenarien Optionen für die Zukunft*. McGraw-Hill: Hamburg.

Dr. Michael H. Ruge
Siemens AG
OEN MC 12
Hofmannstr. 51
D-81359 München

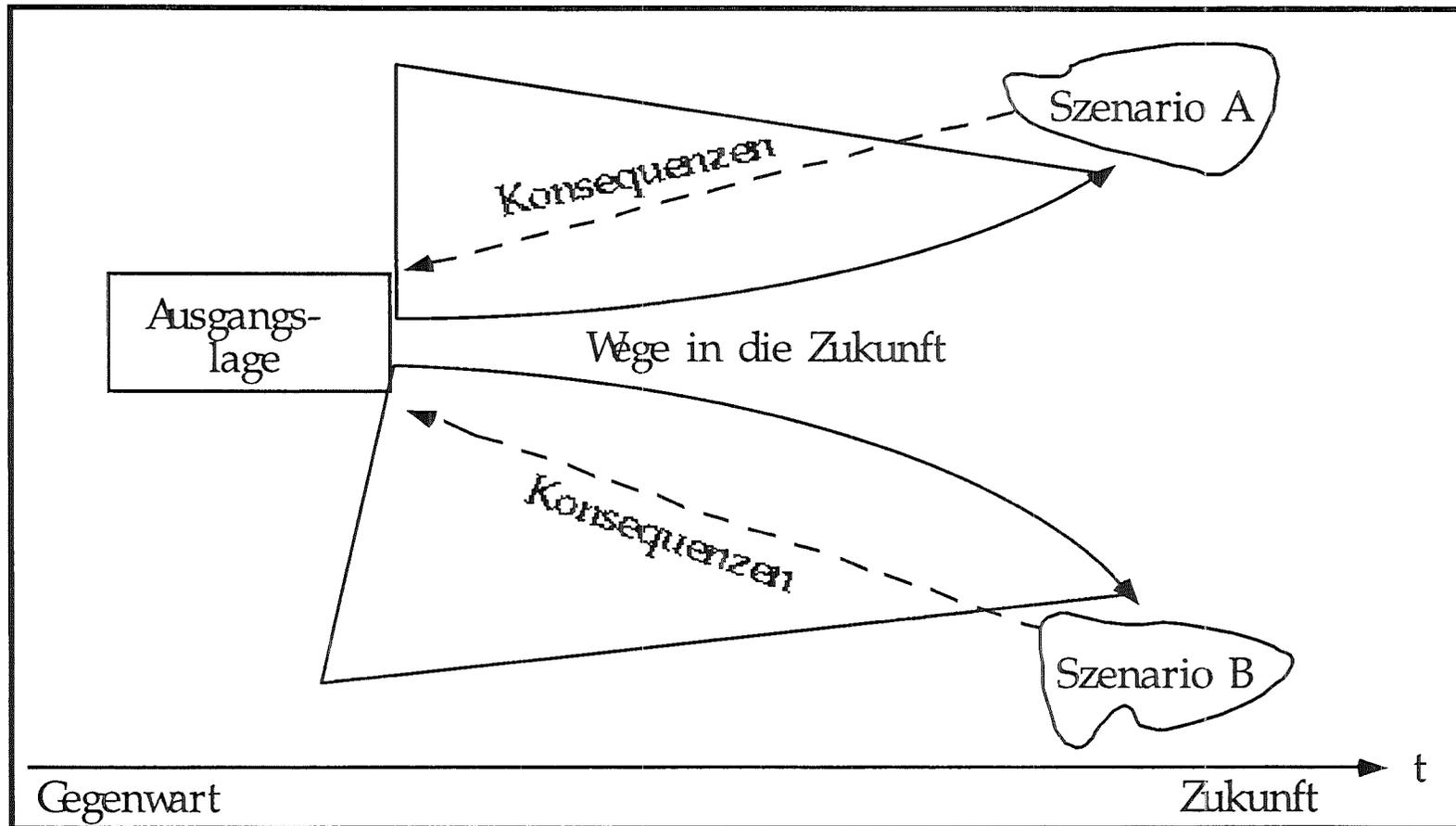
E-mail: Michael.Ruge@oen-m.siemens.de
Michael.Ruge@zfe.siemens.de

Szenariotechnik und Informationsvisualisierung

**Michael H. Ruge
Siemens AG
OEN MC 12**

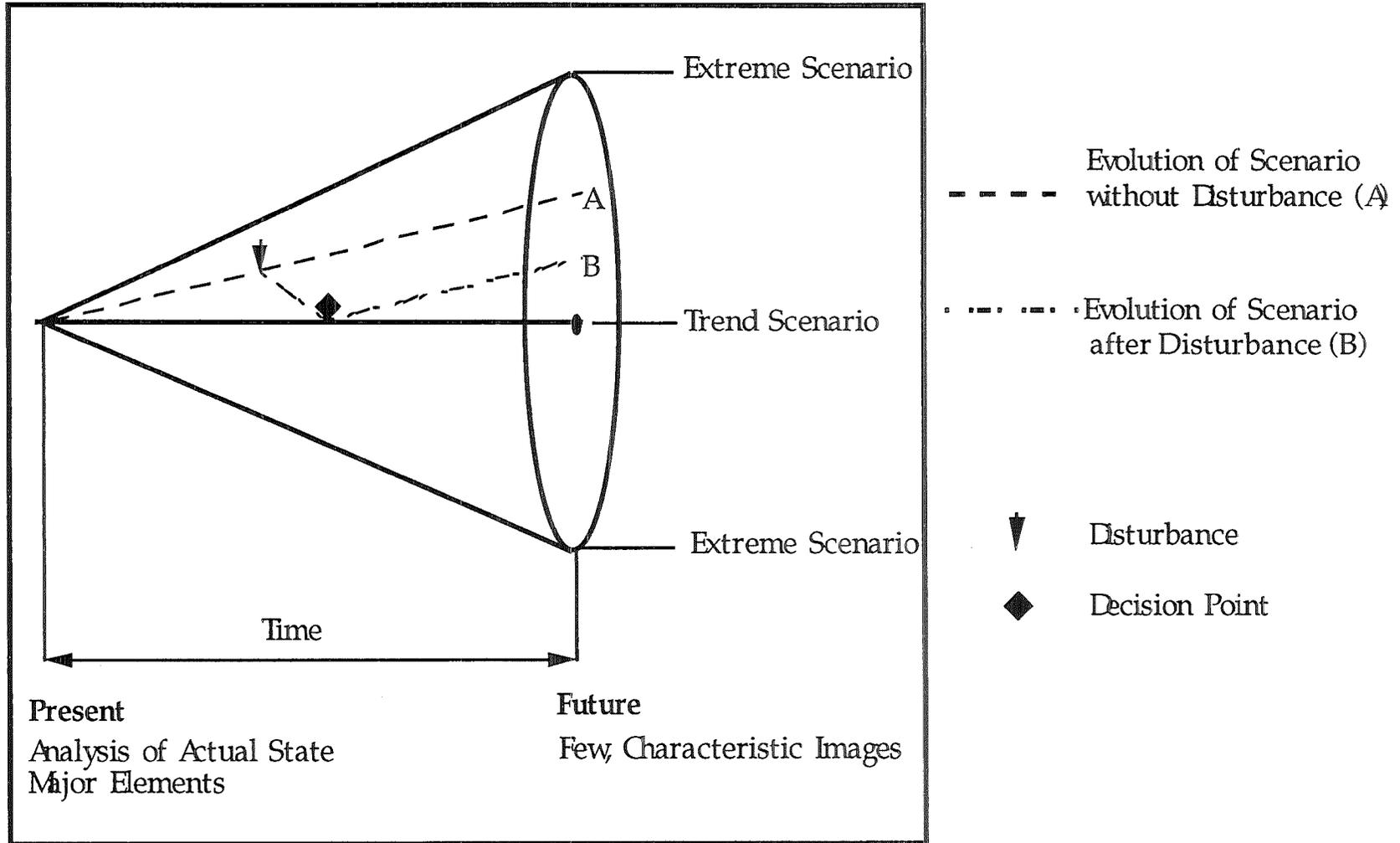
Unter einem Szenario versteht man sowohl die Beschreibung einer möglichen zukünftigen Situation als auch das Aufzeigen des Entwicklungsverlaufs, der zu dieser zukünftigen Situation hinführt.

Wege in die Zukunft



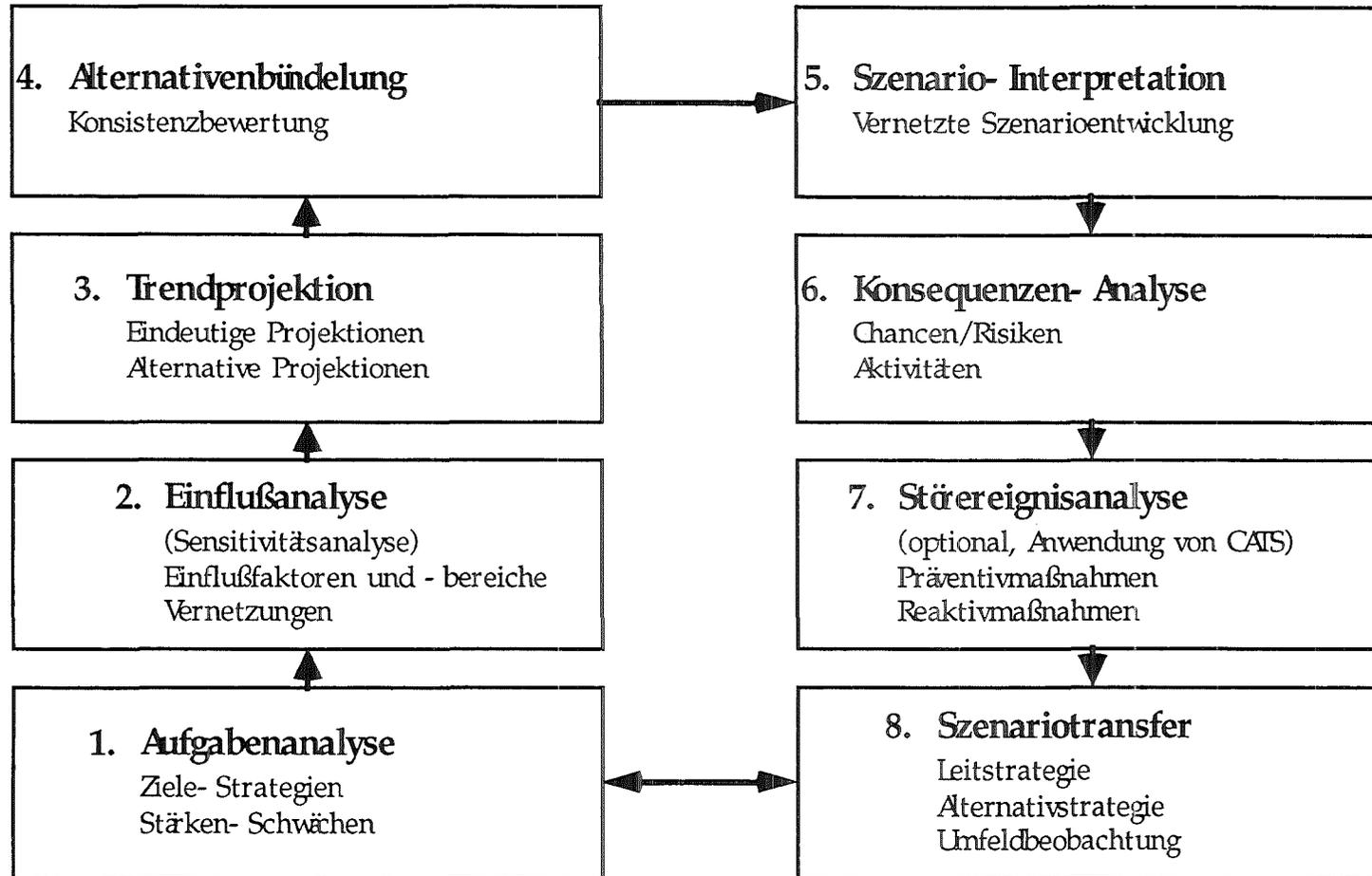
Die Szenariotechnik entwickelt alternative, in sich konsistente (= stimmige) Zukunftsbilder.

Szenariomodell



Die ersten drei Schritte der Szenariotechnik basieren zum Teil auf Methoden der Sensitivitätsanalyse. Der zeitaufwendigste Teil ist die Auswertung, die zwischen Schritten 4 und 5 liegt. Zwei Tage sind daher mindestens zur Durchführung eines Szenarioworkshops erforderlich.

Ablaufplan



Die Sensitivitätsanalyse dient in erster Linie dazu, ein vernetztes Problem zu visualisieren, und erst in zweiter Linie, es zu modellieren und simulieren. Dazu ist es erforderlich, die Datenmenge zu beschränken und unterschiedliche Meinungen und Standpunkte zuzulassen.

Sensitivitätsanalyse

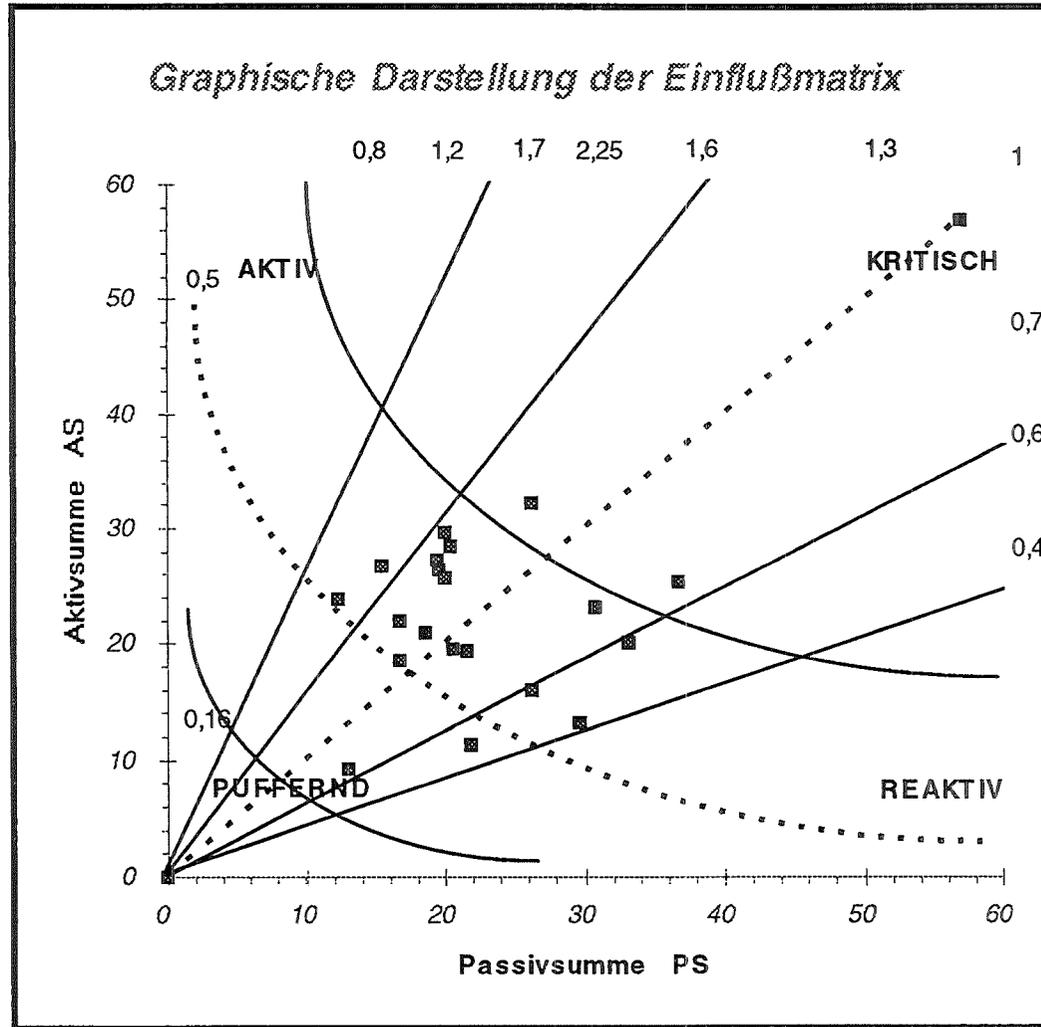
- Komplexe Realitätsauschnitte können durch wenige Daten wesentlich modelliert werden.**
- Neben Fakten müssen auch Meinungen und Standpunkte in ein Systemmodell einbezogen werden.**
- Ein Problem liegt in der Bestimmung der Relationen (Vernetzung).**
- Überleben bildet das Hauptziel der biokybernetischen Interpretation und Bewertung.**

Nach vorläufiger Definition der Variablen findet eine erste Bewertung statt.
Hier sollten alle Workshopteilnehmer involviert werden.

Einflußmatrix

	Wirkung von Zeile auf Spalte	Einflußmatrix Teilmodell Einzelunternehmen (EU)																				Aktivsumme	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	17	18	19	20			
																					AS		
Gesellschaft und Politik	Zukunftsorientierte E&U-Politik	1		2		1	3		3	1	2			2	1		2	1	3	3	3	27	
	Akzeptanz von PV	2				1	2		3	1	1		1	1		1		3				14	
	Kritisches Verhalten der Bevölkerung	3	3	2		1	1	2		1	1			1	1		1	3	1	3		21	
	Image des EU und seiner Produkte	4		2				1	3	1	2		2					3				14	
	Bionische Energieversorgung	5	1	1		1			2	2			1	2	3	2			1		2	18	
Führung und Wirtschaftsweise	Public Relations	6	1	3	1	2			1								1				9		
	Verkauf, Umsatz	7				2				3	3		3				1	1	2		3	18	
	Management & Unternehmensziele des EU	8	1			1		3	1		2		1		3	3	3	3	1	2	2	26	
	Nutzen d. EU	9	1							3			2				1					7	
	Herstellungskosten d. PV-Produkte	10		1		2			3				3	3								12	
	Solidität	11	1	1		3			1	1	3			1			1	1	1			14	
	Wirtschaftl. des Solarstroms	12	3	3		2	2		3	2	3		2					2				22	
Struktur und Produktionsweise	Qualität d. PV-Module, Produkte	13		2	2	2	1	1	3		1	2	2			1		1	2	2	2	24	
	Flexibilität, Diversität	14		2		1	1		2			2			2		1	1				12	
	Innovationfähigkeit des EU	15	1			3	1	1	1		2	3	1	2	3	2		1	2	2		25	
Mensch im Unternehmen	Arbeitsplatzqualität	16													3		1		3			7	
	Identifikation, Motivation d. MA	17							1			2			2	1	2			2	1	11	
Ökologie	Umweltfreundlichkeit der Produkte	18		3	3	3	1	1				2			2		1	1	1		3	3	24
	Stoff- & Energiedurchsatz d. EU	19		3	2	2		1			1	1						1	3		3	17	
	Belastung des Naturhaushalts	20	3	3	3	1	1	1	1		2								1	1		17	
	Passivsumme	PS	15	28	11	28	13	11	28	15	23	12	18	11	20	11	13	7	22	19	18	16	339

Die Einflußindexanalyse, ein Schlüsselbaustein der Sensitivitätsanalyse, ergibt nach ihrer Auswertung eine Charakterisierung der Variablen nach aktiv ./.. reaktiv und kritisch ./.. puffernd.



Auswertung der Einflußindexanalyse

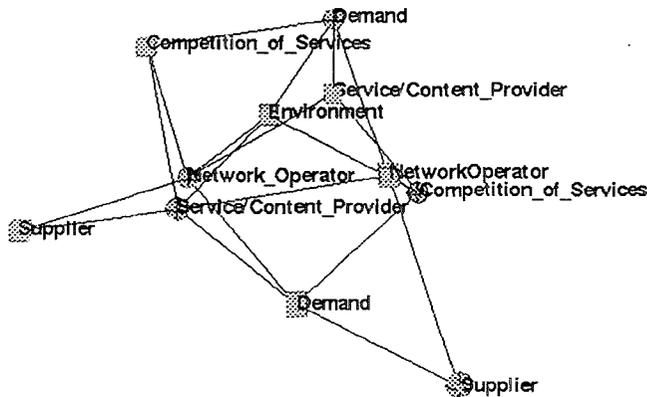
Jedes kleine Viereck steht für eine Variable. Der optische Eindruck zeigt bereits, daß es sich um ein eher aktiv-kritisches System bei diesem Beispiel handelt.

Kontextanalyse Einflußmatrix Einflußbereiche

Environment

Die Kontextanalyse ordnet jeder Zeilen- bzw. Spaltenvariablen einen Kubus bzw. eine Kugel zu.

Die Matrix rechts wird mittels des Prinzips "Kontextuelle Nähe entspricht räumlicher Nähe" in ein 3D-Diagramm umgesetzt.

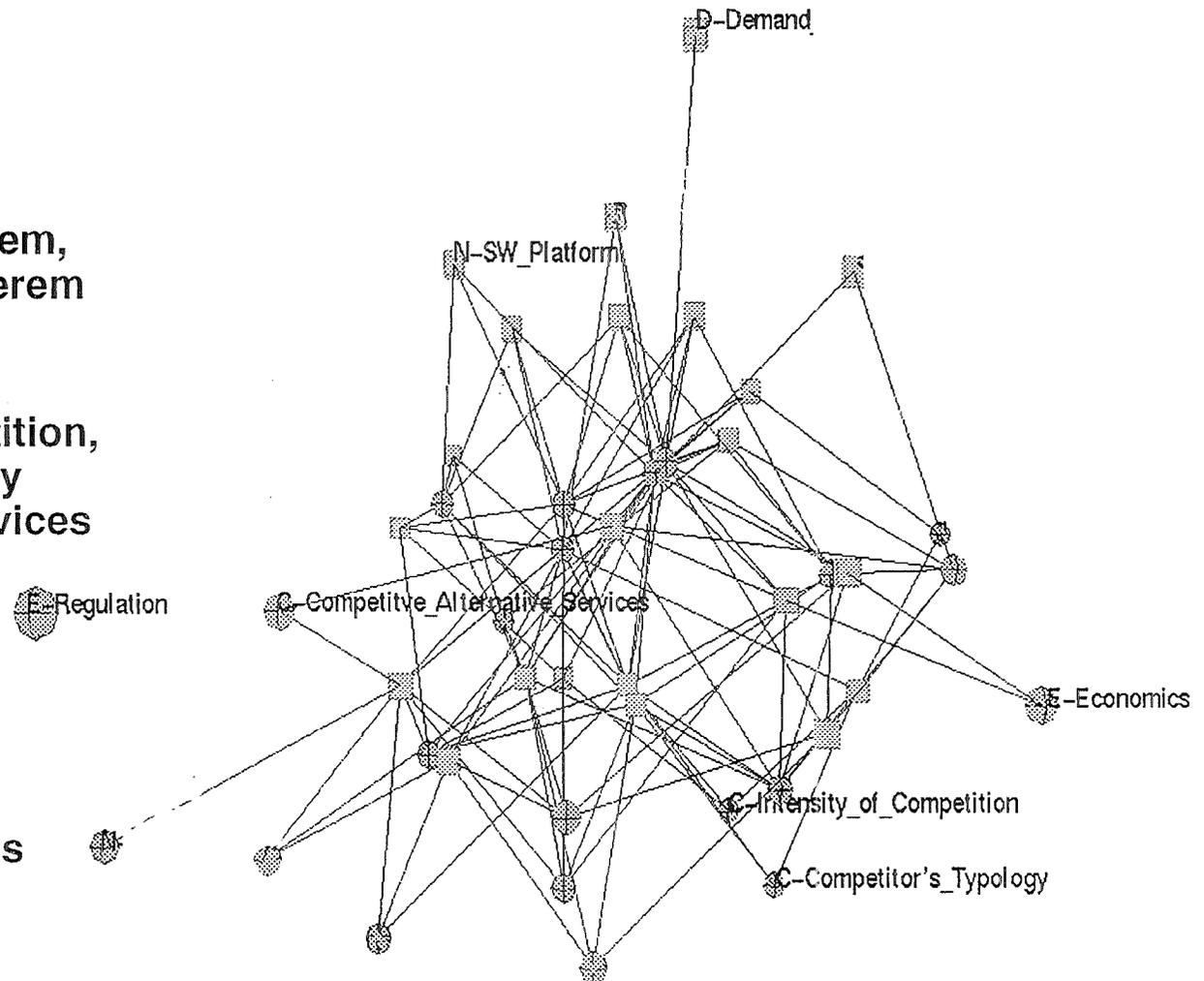


- Der Einflußbereich Environment ist nicht beeinflussbar und liegt außerhalb des Gesamtsystems. Er wirkt aber zentral auf die anderen Bereiche.
- Der Supplier steht außerhalb des Systems und erscheint nicht richtig eingebunden.

Wirkung Zeile auf Spalte	Demand	Network_Operator	Supplier	Environment	Service/Content_Provider	Competition_of_Services
Demand		1	1		1	1
NetworkOperator	1		1		1	1
Supplier		1			1	
Environment	1	1			1	1
Service/Content_Provider	1	1				1
Competition_of_Services	1	1			1	

Einflußmatrix

- Demand wirkt eher gering auf das System, wird also nach unserem Modell für nicht so zentral angesehen.
- Intensity of Competition, Competitive Typology und Comp. Alt. Services werden schwach beeinflusst.
- Economics und Regulation sind fast nicht beeinflussbar und stehen etwas außerhalb des Systems.



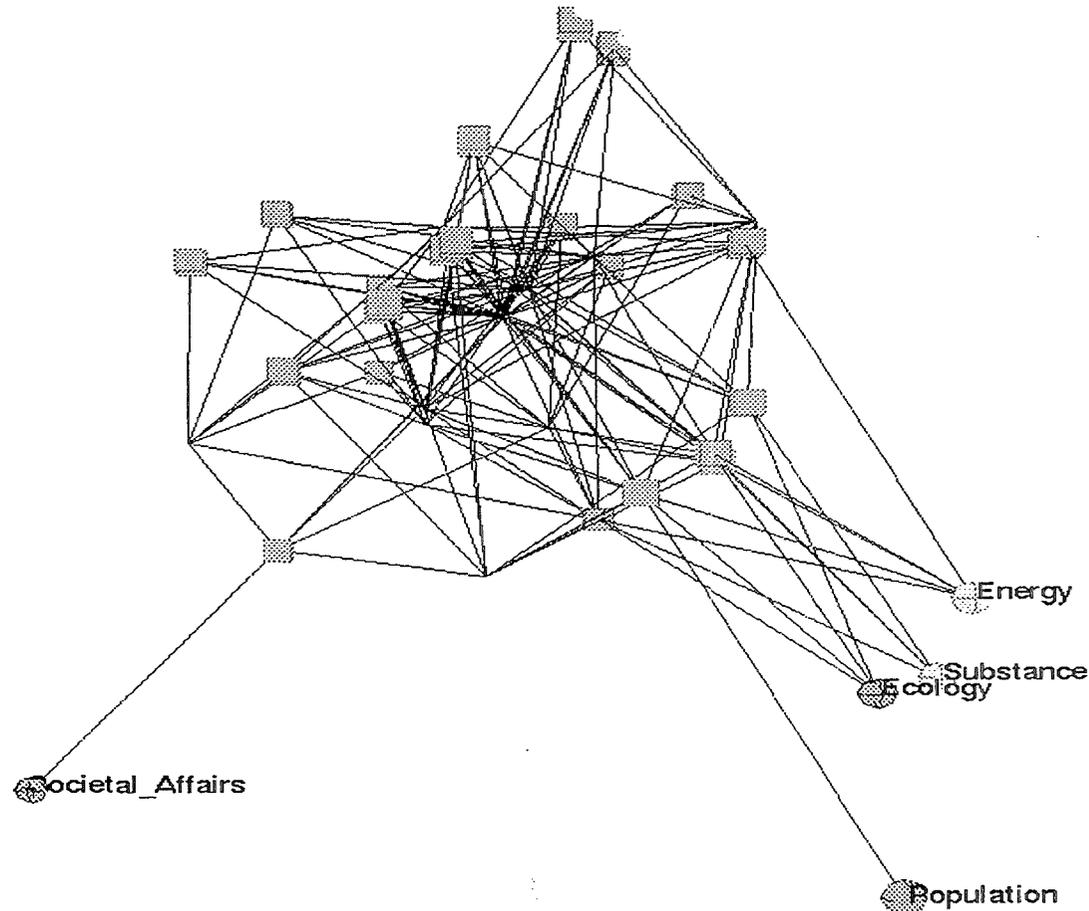
Die Kriterienmatrix kann entweder während des Workshops erstellt werden oder aber nach Schritt 2 von einem kleineren Kreis der Workshopteilnehmer ausgefüllt werden. Sie dient dem tieferen Verständnis der Variablen.

Kriterienmatrix

Kriterienmatrix: Einzelunternehmen (EU)	Lebensbereiche						Phys. Größen			Strukturgrößen				Systemgrößen				
	Wirt- schaft	Bevölker- ung	Human- ökologie	Natur- haushalt	Infra- struktur	Gemein- wesen	Ma- terie	Ener- gie	Infor- mation	Fluß- größen	Struktur- größen	Zeitl. Dynamik	Räuml. Dynamik	Öffnet Sys. d. Input	Öffnet Sys. d. Output	Von Innen beeinflußbar	Von Außen beeinflußbar	
Gesellschaft und Politik																		
Zukunftsorient. E&U-Politik	1					1		1		1	1			1		0,5	0,5	
Akzeptanz von PV	2		1					1		1							1	
Kritisches Verhalten d. Bevölk.	3		1					1	1		1			1			1	
Image des Unternehmens	4		1					1		1					1	1		
Bionische Energieversorgung	5			1		1		1			1		1				1	
Führung und Wirtschaftsweise																		
Public Relations	6	1						1	1		1	1			1	1		
Vertrieb, Umsatz	7	1						1		1		1			1	1		
Management&Unternehmensziele	8	1						1		1	1					1		
Nutzen d. EU	9	1						1		1	1						1	
Herstellungskosten PV-Produkte	10	1								1					1	0,5		
Solidität	11	1							1	0,5	1						1	
Wirtschaftl. d. Solarstroms	12	1										1			1	0,5	0,5	
Struktur und Produktionsweise																		
Qualität PV-Module, Produkte	13		1				1		1		1				1	1		
Flexibilität, Diversität	14	1	1	1		0,5			1		1						1	
Innovationsfähigkeit d. EU	15	1							1			1						
Mensch im Unternehmen																		
Arbeitsplatzqualität	16		1	1			1				1		1				1	
Identifikation, Motivation d. MA	17	1		1					1				1					
Ökologie																		
Umweltfreundlichkeit d. Produkte	18				1		1				1	1			1	1		
Stoff- u. Energiedurchsatz	19				1	1	1	1		1		1		1	1	0,5	0,5	
Belastung d. Naturhaushalts	20				1		1	1			1		1		1	0,5	0,5	
Summe		10	6	4	3	2,5	2	5	3	13	4,5	13	9	6	3	9	11,5	6

Kriterienmatrizen können analog Einflußmatrizen visualisiert werden.

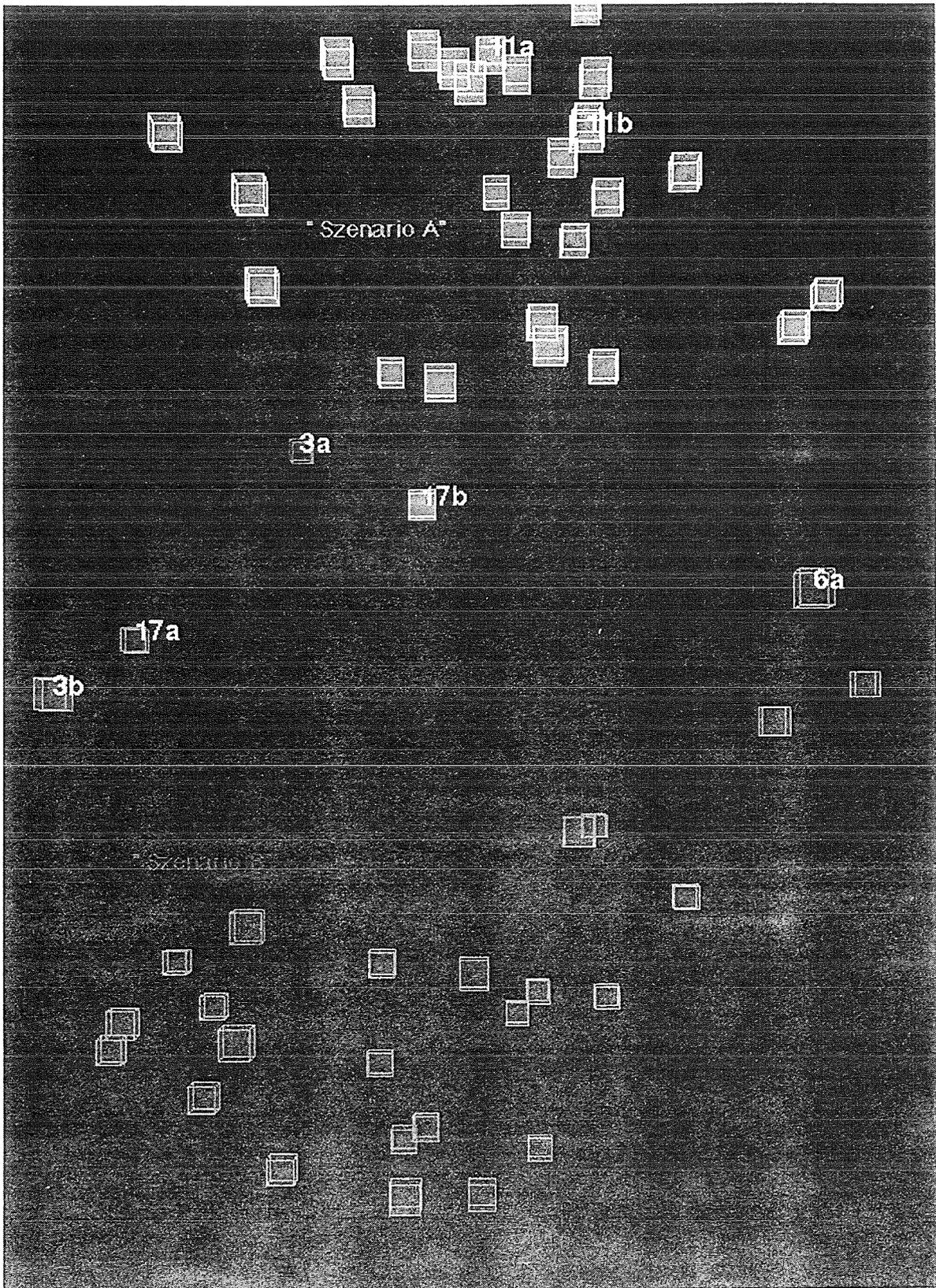
Kriterienmatrix



- Das System ist durchweg gut vernetzt. Zentral in der Mitte finden sich Variable wie Nachfrage und Umsatz
- Societal Affairs, Ecology und Population sind Größen, die (fast) nicht beeinflusst werden (s.o.).
- Energy und Substance sind nur schwach vertreten. --> Modellproblem

	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b	6a	6b	7a	7b	8a	8b	9a	9b	10a	10b	11a	11b	12a	12b	
1a	2																								
1b	-2	2																							
2a	2	-1	2																						
2b	-1	1	-2	2																					
3a	2	1	2	1	2																				
3b	1	1	1	0	-2	2																			
4a	2	-1	2	-1	2	-1	2																		
4b	1	1	1	1	1	1	-2	2																	
5a	-1	1	-1	1	0	0	-1	1	2																
5b	2	-1	2	0	0	0	1	-1	-2	2															
6a	0	0	0	0	2	-1	0	0	0	0	2														
6b	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	-2	2													
7a	2	0	1	0	1	-1	2	1	1	1	0	0	2												
7b	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0	0	-2	2											
8a	-2	-1	-1	1	-2	1	-1	1	1	-1	0	0	0	0	2										
8b	2	-1	2	-1	2	0	1	1	1	1	0	0	0	0	-2	2									
9a	-2	1	0	1	-1	1	-1	1	1	-1	0	0	-1	1	2	-2	2								
9b	2	-1	2	-1	2	-1	2	-1	-1	1	0	0	1	-1	-2	2	-2	2							
10a	0	0	0	0	1	-1	0	0	-1	1	0	0	0	0	1	-1	-1	1	2						
10b	0	0	0	0	-1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	-1	0	1	-1	-2	2					
11a	2	1	1	-1	0	0	2	1	-1	1	0	0	1	-1	-1	2	-2	2	-1	1	2				
11b	-1	1	-1	2	0	0	-1	1	1	-1	0	0	-1	1	-1	-2	-2	-2	1	-1	-2	2			
12a	2	-1	2	-1	1	-1	2	1	-1	1	0	0	1	-1	-2	2	-1	2	2	-2	-1	-1	2		
12b	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0	0	-1	1	2	-2	1	-1	-2	2	-1	-1	-2	2	
13a	1	0	1	0	2	-2	0	0	-1	1	1	-1	0	0	-1	1	-1	1	-2	2	-1	-1	2	-1	
13b	-1	0	-1	0	-1	1	0	0	1	-1	-1	1	0	0	1	-1	1	-1	2	-2	-1	-1	-1	1	
14a	2	1	1	0	1	-1	2	1	0	0	1	-1	0	0	-1	1	-1	1	-1	2	2	-1	-1	1	
14b	-1	1	-1	1	-1	1	0	1	0	0	-1	1	0	0	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	
15a	2	-1	2	-1	1	-1	0	0	-1	1	0	0	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	2	-1	
15b	-1	1	-1	1	-1	1	0	0	1	-1	0	0	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	
16a	2	-1	1	-1	1	-1	2	-1	-1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	2	-1	2	-1	
16b	-2	1	0	1	0	1	-1	1	1	-1	0	0	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
17a	-1	0	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0	0	0	0	1	-1	2	-2	2	-2	-1	-1	-1	-1	
17b	2	-1	2	-1	2	-1	2	-2	-1	1	0	0	0	0	-1	1	-2	-2	-2	2	-1	-1	2	-1	
18a	-1	0	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	-1	2	-2	-1	-1	-1	1	
18b	2	-1	2	-1	2	-1	1	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	-1	1	-2	2	2	-1	2	-1	
19a	-1	1	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	-1	-1	-1	1	
19b	1	-1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	2	-1	-1	-1	
20a	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	
20b	1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	
21a	-1	0	0	0	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	
21b	1	-1	0	0	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0	1	-1	2	-1	
22a	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	2	-2	0	0	-1	1	-1	1	1	1	2	-1	0	0	
22b	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	-2	0	0	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	0	0	
23a	2	-1	2	-2	0	0	2	-1	0	0	0	0	1	-1	-1	2	-2	2	-1	1	2	-1	0	0	
23b	-1	1	-2	1	0	0	-1	1	0	0	0	0	-1	1	1	-1	2	-2	1	-1	-1	1	0	0	
24a	-1	1	-1	1	0	0	0	0	1	-1	0	0	-1	1	-1	1	2	-1	0	0	-1	-1	-1	1	
24b	1	-1	1	-1	0	0	0	0	-1	1	0	0	1	-1	1	-1	-1	2	-1	1	2	-1	2	-1	
25a	-1	1	-1	1	-1	1	0	0	1	-1	0	0	-1	1	-1	1	2	0	-2	2	-1	1	-1	1	
25b	1	-1	1	-1	2	-1	0	0	-1	1	0	0	1	-1	1	-1	-1	2	2	-2	2	-2	2	-1	
26a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	-2	2	-1	-1	-1	1	
26b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	2	-2	2	-1	1	-1	
27a	1	-1	1	-1	1	1	2	-1	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	1	-1	2	-1	0	0	
27b	0	1	-1	1	0	1	-1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	-1	1	-1	-1	0	0	
28a	2	-1	1	-1	0	0	1	-1	0	0	0	0	1	-1	-1	1	-2	2	0	0	2	-1	0	0	
28b	-1	1	-1	1	0	0	-1	1	0	0	0	0	-1	1	1	-1	2	-2	0	0	-1	-1	0	0	
29a	2	-1	1	-1	0	0	1	-1	-1	1	0	0	1	-1	-2	2	-2	2	0	0	2	-1	0	0	
29b	-1	1	-1	1	0	0	-1	1	1	-1	0	0	-1	1	2	-2	2	-2	0	0	-1	-1	0	0	
30a	2	-1	1	-1	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	-2	2	-2	2	-2	2	2	-1	0	0	
30b	-1	1	-1	1	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	2	-2	2	-2	2	-2	0	1	0	0	
31a	2	-1	-1	1	2	-1	2	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	2	1	-1	2	-1	0	0	
31b	-2	1	1	-1	-1	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	-2	-1	1	-1	1	0	0	
E1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Konsistenzmatrix



Auswertung: untere Dreiecksmatrix

5. AK - Treffen 02.03. - 03.03.1995

Teilnehmerliste

Name	Anschrift	Telefon oder e-mail
Alex, Jens	ifak Steinfeldstraße 39179 Barleben	Telefon: 03920381044
Benz, Joachim	Universität Gesamthochschule Kassel Fachbereich 11 Nordbahnhofstr. 1a 37213 Witzenhausen	Telefon: 05542 981560 email: benz@wiz.uni-kassel.de
Drews, Frank	Ingenieurunternehmen für Umweltanalyse und Forschung GmbH, Gebäude 2.3 Rudower Chaussee 5 12489 Berlin	Telefon: 030 63922140 Fax: 030 63922140
Dubsky, Gerolf	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg Agro-Ökosystemforschung Postfach 2 Harzweg 29 06472 Quedlinburg	Telefon: 03946 965615
Gräber, Peter-Wolfgang	TU Dresden Inst. für Grundwasserwirtschaft Mommensenstr. 13 01062 Dresden	Telefon: 0351 257970 email: graeber@hgwws1.wasser.tu- dresden.de
Grebe, Norbert	Universität Passau Lehrstuhl Operationsresearch und Systemtheorie Innstr. 33 94030 Passau	Telefon: 0851 509-3149 email: grebe@forwiss.uni-passau.de
Grützner, Rolf	Universität Rostock Fachbereich Informatik Institut für Praktische Informatik Albert-Einstein-Str. 21 18059 Rostock	Telefon: 0381 4983369 Fax: 0381 4983426 email: gruet@informatik.uni-rostock.de
Häuslein, Andreas	Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH Im Winkel 3 20251 Hamburg	Telefon: 040 462033
Hohmann, Rüdiger	Technische Universität Magdeburg Institut für Simulation und Graphik PSF 4120 39016 Magdeburg	email: hohmann@informatik.uni- magdeburg.d400.de
Hubert, Maria-Luise	Universität Rostock FB Biologie Wismarsche Str. 8 18057 Rostock	Telefon: 0381 4925210 email: nfd002@cks1.rz.uni-rostock.de

Jahrs, Gerhard	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode Institut für Biosystemtechnik Bundesallee 50 38116 Braunschweig	Telefon: 0531 596466 Fax: 0531 596369 email: jahrs@bst.fal.de
Keller, Hubert	Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Angewandte Informatik PSF 3640 76021 Karlsruhe	Telefon: 07247 82-5756 Fax: 0724782-5730 email: keller.iai.kfk.d400.de
Lorek, Helmut	OFFIS Westerstr. 10-12 26121 Oldenburg	Telefon: 0441 798-3056 email: lorek@informatik.uni-oldenburg.de
Lutze, Gerd	Zentrum für Agrarlandschafts- und Land	Telefon: 033432 82395
Möbus, Erik	Technische Universität Magdeburg Institut für Simulation und Graphik PSF 4120 39016 Magdeburg	email: moebus@sunpool.cs.uni- magdeburg.de
Münzer, Bernhard	GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH PUC Ingolstädter Landstr. 1 85758 Neuherberg	Telefon: 089 3187-2425 Fax: 089 3187-3369 email: mue@gsf.de
Nekien, Timo	Universität Rostock Fachbereich Informatik Institut für Praktische Informatik Albert-Einstein-Str. 21 18059 Rostock	Telefon: 0381 4983372 Fax: 0381 4983426 email: tnekien@informatik.uni-rostock.de
Ortmann, Jörg	Universität Rostock Fachbereich Informatik Institut für Praktische Informatik Albert-Einstein-Str. 21 18059 Rostock	Telefon: 0381 4983368 Fax: 0381 4983426 email: jortmann@informatik.uni- rostock.de
Page, Bernd	Universität Hamburg FB Informatik Vogt-Kölln-Str. 30 22527 Hamburg	Telefon: 040 54715425
Paul, Wolfgang	Institut für Biosystemtechnik Forschungsanstalt für Landwirtschaft Bundesallee 50 38116 Braunschweig	Telefon: 0531 596468 Fax: 0531 596369
Ranze, K. Christoph	Universität Bremen Arbeitsgruppe KI, Fachbereich 3 Postfach 330440 28325 Bremen	Telefon: 0421 218-7282 Fax: 0421 218-7196 email: kcr@informatik.uni.-bremen
Ruge, Michael	Siemens AG ÖN MC12 Hofmannstr. 51 81359 München	Telefon: 098 72224783 email: Michael.Ruge@oen-m.siemens.de

Siestrup, Guido	Universität Bremen FB 7 Postfach 330440 28325 Bremen	Telefon: 0421 218-7387
Sonnenberger, Kirsten	BEC-Vertriebsgesellschaft mbH TZW Richard-Wagner-Str. 31 18119 Warnemünde	Telefon: 0381 5196134 Fax: 0381 5196135
Sonnenschein, Michael	(OFFIS) Universität Oldenburg Fachbereich 10 Postfach 2503 26111 Oldenburg	Telefon: 0441 798-2199 email: sunny@informatik.uni-oldenburg.de
Tuma, Axel	Universität Bremen Fachbereich 7 Postfach 330440 28334 Bremen	Telefon: 0421 2187387 email: atuma@zfn.uni-bremen.de
Thin, N.X.	Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden Weberplatz 1 01217 Dresden	Telefon: 0351 4670-260 Fax: 0351 4679 212
Wieland, Ralf	Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnahrungsforschung Müncheberg	Telefon: 033432 82337 email: wieland@contrib.de
Weigelt, Klaus	BEC-Vertriebsgesellschaft mbH TZW Richard-Wagner-Str. 31 18119 Warnemünde	Telefon: 0381 5196134 Fax: 0381 5196135

Fachgruppe 'Informatik im Umweltschutz'

Ausgangspunkt und Historie

Zur Lösung der anstehenden Aufgaben im Umweltschutz ist die Entwicklung einer leistungsfähigen Informationsverarbeitung erforderlich. Der Informatik kommt hierbei eine zentrale Rolle und damit verbunden eine entsprechende Verantwortung zu. In der Schriftenreihe 'Schlüsseltechnologie Informationsverarbeitung' der Gesellschaft für Informatik (GI) informiert eine eigene Broschüre 'Umwelt & Informatik' über diese Thematik.

Wegen der großen Bedeutung des Themas wurde 1986 in der Gesellschaft für Informatik der Fachausschuß FA 4.6 und die Fachgruppe FG 4.6.1 'Informatik im Umweltschutz' gegründet.

Ziele, Aufgabe

Die Fachgruppe befaßt sich mit allen Fachfragen des Informatikeinsatzes in den Bereichen Umweltschutz, Umweltplanung, Umweltsanierung und Umweltforschung. In ihr arbeiten derzeit etwa 800 Fachleute aus Forschung, Lehre, Verwaltung und Industrie zusammen. Die Fachgruppe hat das vorrangige Ziel, den Erfahrungsaustausch und die wechselseitige Anregung zwischen Forschung, Entwicklung und Anwendung zu fördern und die Basis für einen intensiveren und qualitativ verbesserten Einsatz der Informatik bei der Lösung von Umweltproblemen zu schaffen. Sie hat insbesondere die Aufgabe, die Verbreitung und den Einsatz moderner Informatikmethoden und -techniken im Umweltbereich zu fördern und die Entwicklung leistungsfähiger, anwendungsspezifischer Informatikwerkzeuge fachlich zu unterstützen.

Aktivitäten

Die Fachgruppe veranstaltet seit 1986 jährlich ein Symposium, auf dem neben dem gesamten Themenspektrum der Informatik im Umweltschutz jeweils ein bestimmtes Schwerpunktthema behandelt wird. Die Fachbeiträge werden in einem ausführlichen Tagungsband publiziert. Die Symposien verzeichnen Teilnehmer aus Forschung, Industrie und Behörden und stoßen auf sehr große Resonanz in der Fachöffentlichkeit. Zweimal im Jahr finden Sitzungen der Fachgruppe statt, die der Diskussion der fachlichen und organisatorischen Probleme dienen. Als Mitteilungsorgan der Fachgruppe dient der 2-3mal jährlich erscheinende Rundbrief 'Informatik im Umweltschutz'. In ihm wird über die aktuellen Entwicklungen und Aktivitäten berichtet. Er enthält auch eine Liste der Publikationen der Fachgruppe.

Arbeitskreise

Zur Bearbeitung besonderer Themenbereiche werden Arbeitskreise eingesetzt, die wiederum eigene Workshops und Arbeitstagen zu ihren Spezialthemen durchführen.

Mitarbeit in der Fachgruppe

Die Mitarbeit in der Fachgruppe 'Informatik im Umweltschutz' ist nicht zwingend an eine gleichzeitige Mitgliedschaft in der GI gebunden. Es wird jedoch angestrebt, daß Fachgruppenmitglieder in der Regel auch GI-Mitglieder sind oder werden. Anträge auf Aufnahme in die GI oder die Fachgruppe sind an die Geschäftsstelle der GI zu richten:

Gesellschaft für Informatik e.V. (GI)
Godesberger Allee 99
D-53175 Bonn

Arbeitskreis 'Werkzeuge für die Simulation und Modellbildung'

Der Arbeitskreis 'Werkzeuge für die Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen' ist ein Arbeitskreis der Fachgruppe 4.6.1 'Informatik im Umweltschutz' der Gesellschaft für Informatik e.V.

Problemstellung

Die Modellierung und Simulation ist eine der wichtigsten Problemlösungsmethoden im Umweltbereich, um Vorhersagen und Abschätzungen des Verhaltens von Umweltsystemen durchzuführen. Das gilt insbesondere bei der Bestimmung der anthropogenen Einwirkungen auf die Umwelt. Dazu sind heute modernste Methoden und Werkzeuge erforderlich, um den komplexen Umweltsystemen bei den wachsenden Umwelthanforderungen gerecht zu werden.

Eine der wesentlichsten Aufgaben der Informatik ist es, hierfür geeignete Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, sie einem breiten Anwendungskreis verfügbar zu machen und die Kenntnisse zur Nutzung zu vermitteln.

Historie, Ziel und Themen des AK

Der AK wurde im März 1992 gegründet. Er hat sich zum Ziel gesetzt, die Erarbeitung der fachlichen Grundlagen der Modellbildung und Simulation im Umweltbereich sowie der zugehörigen Methoden und Softwarewerkzeuge zu fördern. Der AK bildet eine Basis für den Informationsaustausch der in diesem Bereich Tätigen. Insbesondere wird die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Informatikern, Anwendern und Fachexperten aus einschlägigen Bereichen gefördert. Der Arbeitskreis arbeitet mit der "Arbeitsgemeinschaft Simulation" ASIM eng zusammen.

Schwerpunkthemen sind:

Systeme und Werkzeuge zur Modellbildung und Simulation/Schnittstellen
Simulations- und Experimentiermethoden
Modellbildung im Umweltbereich
Anwendungen und Integration
Simulation und Umweltinformationssysteme

Aktivitäten

Der Arbeitskreis veranstaltet Workshops und Treffen der Mitglieder und Interessierten zum Themenkreis des AK. Bisher wurden folgende Workshops durchgeführt:

1. Workshop "Modellierung und Simulation im Umweltbereich",
25.6.-26.6.1992, Universität Rostock
2. Workshop "Werkzeuge für die Simulation und Modellbildung in
Umweltanwendungen", FH Karlsruhe, 5.11.-6.11.1992
3. Workshop "Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in
Umweltanwendungen" 28.10.-29.10.1993; GH-Kassel, Teil Witzenhausen
4. Workshop: 23.6.-24.6.1994; Martin-Luther-Universität Halle
5. Workshop: 2.3.-3.3.1994 Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
Braunschweig-Völkenrode

Leiter / Ansprechpartner

Prof. Dr. habil. Rolf Grützner
Universität Rostock, FB Informatik
Lehrstuhl Modellierung/Simulation
Albert-Einstein-Str. 21
D - 18051 Rostock
Tel.: (0381) 4983369 Fax: (0381) 446089
Email: gruet@informatik.uni-rostock.de

Bisherige Veröffentlichungen

Grützner, R.; Möller, A.; Pawletta, Th. (Hrsg.): Beiträge zum Workshop Modellierung und Simulation im Umweltbereich. 25.6.-26.6.1992, Universität Rostock, FB Informatik, 1992

Keller, H. B.; Grützner, R. (Hrsg.): 2. Treffen des AK "Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen". Berichte des Kernforschungszentrums Karlsruhe, KfK 5159, März 1993

Keller, H. B.; Grützner, R.; Benz, J. (Hrsg.): 3. Treffen des AK "Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen". Berichte des Kernforschungszentrums Karlsruhe, KfK 5310, April 1994

Keller, H. B.; Grützner, R.; Angelus, R. (Hrsg.): 4. Treffen des AK "Werkzeuge für Simulation und Modellbildung in Umwelthanwendungen". Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe - Technik und Umwelt, FZKA 5552.