UFZ - Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH

UFZ-Bericht

UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht

Nr. 6/1998

Landschaftsbewertung unter Verwendung analytischer Verfahren und Fuzzy-Logic

Ergebnisse des Workshops

"Einsatzmöglichkeiten von Fuzzy Sets in der Landschaftsbewertung"

vom 26. bis 28. Februar 1997
am UFZ-Umweltforschungszentrum
Leipzig-Halle GmbH

Ralf Grabaum und Uta Steinhardt (Hrsg.)

ISSN 0948-9452

Landschaftsbewertung unter Verwendung analytischer Verfahren und Fuzzy-Logic

Ergebnisse des Workshops

"Einsatzmöglichkeiten von Fuzzy Sets in der Landschaftsbewertung"

vom 26. bis 28. Februar 1997
am UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH

Ralf Grabaum[1] und Uta Steinhardt[2] (Hrsg.)

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
[1] Projektbereich Naturnahe Landschaften und Ländliche Räume
[2] Sektion Angewandte Landschaftsökologie

Vorwort der Herausgeber

Werte Leser,

im Mittelpunkt der Arbeiten an der Sektion Angewandte Landschaftsökologie am UFZ stehen Fragen der Landschaftsbewertung. Diese Forschungsrichtung hat sich am UFZ etabliert. Besonders Mitarbeiter der Sektion Angewandte Landschaftsökologie, aber auch im Projektbereich Naturnahe Landschaften und Ländliche Räume sowie in der Sektion Bodenforschung beschäftigen sich intensiv mit dieser Fragestellung.

Durch Diskussionsrunden in loser Folge wurde ein Rahmen geschaffen, in dem Forschungsansätze einem interessierten Publikum vorgestellt werden. Dabei stellten zunächst Mitarbeiter aus dem Hause in einzelnen Beiträgen ihre Ideen vor, die dann teilweise auch kontrovers diskutiert wurden. Neben der Aufbereitung und Adaption „klassischer" Ansätze zur Landschaftsbewertung wurden auch Überlegungen zur Anwendbarkeit der Theorie der unscharfen Mengen (Fuzzy-Sets) integriert.

Um auch Forschungen anderer Wissenschaftler mit Ansätzen aus dem Bereich Fuzzy-Logic in der Landschaftsbewertung kennenzulernen und einen diesbezüglichen Meinugsaustausch anzuregen, wurde vom 26. bis 28. Februar 1997 ein dreitägiger Workshop organisiert. Der Einladung dazu folgten mehrere Wissenschaftler aus dem deutschsprachigen Raum. In intensiven Vortrags- und Diskussionsrunden wurde der Ansatz der Fuzzy-Logic in der Landschaftsbewertung besprochen und an ausgewählten Beispielen in der praktischen Anwendung dargestellt.

Die einzelnen Beiträgen wurden im vorliegenden Band zusammengefaßt, um sie auch einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen und die Diskussion um Ansätze der Landschaftsbewertung anzuregen. Gleichzeitig geben sie einen Überblick über die am UFZ betriebenen Forschungen im Bereich der Landschaftsbewertung.

Die Herausgeber danken den Referenten und allen, die zum Gelingen des Workshops beitrugen und an diesem Band mitgearbeitet haben.

Leipzig, im März 1998

Inhaltsverzeichnis

Landschaftsbewertung und Leitbildentwicklung - Zum Stand der landschaftsökologischen Forschung am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle 7

1 Ökologische Landschaftsbewertungen - Entwicklung, Probleme, Beispiele 10

1.1 Entwicklung, Stand und Perspektiven der Landschaftsbewertung *10*

1.1.1 Einleitung 10

1.1.2 Grundlagen für die landschaftsökologische Bewertung 10

1.1.3 Nutzungsbezogene Bewertung von Landschaftskomponenten 12

1.1.4 Integrative Bewertung landschaftshaushaltlicher Funktionen und Potentiale 17

1.1.5 Systematisierung der verschiedenen Landschaftsbewertungsverfahren 22

1.1.6 Ausblick 25

1.2 Polyfunktionale und Multifunktionale Landschaftsbewertung - ein Vergleich *27*

1.2.1 Einleitung 27

1.2.2 Ausgangspunkt und Datenerfordernisse 29

1.2.3 Verfahrensstruktur 29

1.2.4 Merkmale und Gewichtung 33

1.2.5 Merkmalsausprägungen und Wirkungsfunktionen 34

1.2.6 Bewertungsformel und -ergebnisse 35

1.2.7 Fazit 37

1.3 Bewertung von Landschaftsstrukturen auf topischem Niveau zur Ableitung von Entwicklungszielen in Agrarlandschaften *39*

1.3.1 Einleitung 39

1.3.2 Topische Dimension und Bewertung 39

1.3.3 Primäre und Sekundäre Landschaftsstruktur 43

1.3.4 Regionale Landschaftsstrukturbewertungen und Umweltqualitätsziele 47

1.3.5 Vor- und Nachteile von Landschaftsstrukturbewertungen 48

1.4 Konzept der ökologisch-ökonomischen Bewertung von erneuerbaren Ressourcen - dargestellt am Beispiel des Grundwasserschutzes im Torgauer Raum *51*

1.4.1 Einleitung 51

1.4.2 Problemsituation im Torgauer Raum 51

1.4.3 State-of-the-art-Verfahren 54

1.4.4 Forschungsdefizite und Lösungsansätze 57

1.4.5 Konzept zur ökologisch-ökonomischen Bewertung des Grundwasserschutzes 63

2 Raumbezogene Bewertungsmöglichkeiten auf der Grundlage von Fuzzy Sets 68

2.1 Einführung und Problemstellung *68*

2.2 Allgemeine Bemerkungen zur Fuzzy Methodik und mögliche Einsatzbereiche 73

2.3 Mathematische Grundlagen 78

2.4 Fuzzy Control Tools und Fuzzy Shells 87

3 Anwendungsbeispiele 93

3.1 Anwendung eines Fuzzy-Klassifikationssystems zur wissensbasierten Thermalbildauswertung 93

3.2 Anwendung von Fuzzy-Zahlen und fuzzy-logischen Operatoren mit kompensatorischen Möglichkeiten für Bewertungsprobleme mit GIS 102

3.2.1 Stand und Probleme der Nutzung von Fuzzy-Techniken in GIS 102

3.2.2 Die Verwendung von Fuzzy-Zahlen in einem konventionellen Bewertungsansatz 105

3.2.3 Bewertungsbeispiele mit unscharfen Punkt- und Gewichtungszahlen 107

3.2.4 Die Verwendung eines fuzzy-logischen Verknüpfungsoperators 115

3.3 Einsatz von neuronalen Netzen und Fuzzy-Systemen bei der Habitatmodellierung als Teil einer Landschaftsmodellierung 122

3.3.1 Einleitung und Zielstellung 122

3.3.2 Modellierungsstrategie 123

3.3.3 Ergebnisse 134

3.3.4 Schluß 135

3.4 Klein- und mittelmaßstäbige Landschaftsbewertung unter Einbeziehung der Theorie der unscharfen Mengen 137

3.4.1 Problemstellung 137

3.4.2 Theoretische und methodische Grundlagen 139

3.4.3 Bewertungsbeispiel und kartographische Umsetzung 141

3.4.4 Schlußfolgerungen 143

3.5 Fuzzy-Bewertungsmethodik für heterogene Naturräume - dargestellt am Beispiel der Erosionsbewertung im Westlausitzer Hügel- und Bergland - 145

3.5.1 Die Anwendbarkeit unscharfer Logik in der Landschaftsbewertung 145

3.5.2 Naturräume als Bezugseinheiten für landschaftsökologische Analyse und Bewertung im mittleren Maßstab 146

3.5.3 Die Mesogeochore „Westlausitzer Hügel- und Bergland" als Untersuchungsgebiet 151

3.5.4 Aufbereitung der Datenbasis und Umstrukturierung der Bewertungsverfahren für den Einsatz von Fuzzy-Logik am Beispiel des Widerstandes gegen Wassererosion 152

3.5.5 Besonderheiten bei der unscharfen Bewertung heterogener Räume 159

3.5.6 Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse 161

3.5.7 Zusammenfassung 167

Literatur 169

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1-1: Grundmuster ökologischer Bewertungsverfahren

Abb. 1.2-1: Verfahren der polyfunktionalen Bewertung (nach GRABAUM 1996a, verändert)

Abb. 1.2-2: Verfahren der multifunktionalen Bewertung

Abb. 1.2-3: Beispiel eines validierten Bewertungsverfahrens: Bewertung der Bodenerosionsgefährdung durch Wasser nach Schwertmann et al. (1990) und Verknüpfung der Primärdatenebenen im GIS (nach MEYER & GRABAUM 1996, leicht verändert)

Abb. 1.2-4: Merkmalsbaum zur Definition der Produktionsfunktion Almwirtschaft-Rinderbeweidung PR (nach GRABAUM 1996a)

Abb. 1.2-5: Wirkungsfunktion, welche die Erfüllbarkeit der Produktionsfunktion „Almwirtschaft-Rinder-beweidung", definiert in 8 Stufen, bei 16 verschiedenen Merkmalsausprägungen des Merkmal „Exposition des Hanges" (Himmelsrichtungen) darstellt (s. Beispiel Berchtesgaden in GRABAUM 1996a)

Abb. 1.3-1: Idealstruktur des ländlichen Raumes

Abb. 1.3-2: Untersuchungsraum Gimritz: Biotoptypenverteilung nach eigener Kartierung (1994)

Abb. 1.3-3: Untersuchungsraum Gimritz: Ausschnitt der digitalisierten Bodenschätzungskarte (1936)

Abb. 1.4-1: Verfahrensschritte zur Bewertung des Grundwasserschutzes (BERGSTRÖM et al., 1996, S. 281)

Abb. 1.4-2: Flußbild zur ökologisch-ökonomischen Bewertung des Grundwasserschutzes

Abb. 2.2-1: Möglichkeiten der Integration von Fuzzy-Komponenten in Bewertungsverfahren

Abb. 2.3-1: Konvexe Fuzzy-Menge

Abb. 2.3-2: Mögliche Zugehörigkeitsfunktion zur Fuzzy-Zahl 'ungefähr 4,5'

Abb. 2.3-3: Zerlegung einer Fuzzy-Menge

Abb. 2.3-4: Addition von Fuzzy-Zahlen

Abb. 2.4-1: Prinzipieller Aufbau eines Fuzzy-Systems

Abb. 2.4-2: Schritte zur Erstellung eines Fuzzy-Control-Systems

Abb. 3.1-1: Thermaldaten - Tag

Abb. 3.1-2: Thermaldaten - Nacht

Abb. 3.1-3: Klimarelevante Flächennutzungstypen

Abb. 3.1-4: Thermotop-Karte

Abb. 3.1-5: Fuzzy-Zugehörigkeitskarte zum *Wald*-Thermotop (Ausschnitt).

Abb. 3.1-6: Kombination von fuzzy und diskretem Klassifikationsergebnis der Klasse *Wald*-Thermotop

Abb. 3.1-7: Klimafunktionsräume

Abb. 3.2-1: Lage und Grenzen des Untersuchungsgebietes Berlin Buch

Abb. 3.2-2: Raumanalyse: potentielle Baueignung (konventionelle Bewertung)

Abb. 3.2-3: Raumanalyse: potentielle Baueignung (Fuzzy-Bewertung mit Alpha-Level = 0,85, optimistische Bewertung)

Abb. 3.2-4: Raumanalyse: potentielle Baueignung (Fuzzy-Bewertung mit Alpha-Level = 0,85, konservative Bewertung)

Abb. 3.2-5: Raumanalyse: potentielle Baueignung (Fuzzy-Bewertung mit Alpha-Level = 0,85, Rangdifferenz)

Abb. 3.2-6: Raumanalyse: potentielle Baueignung (Fuzzy-Bewertung mit Rangvergleich, Alpha-Level = 0,85)

Abb. 3.2-7: Bewertungsoberfläche zu einem Restriktionsmodell (Gebietsausschnitt)

Abb. 3.2-8: Bewertung der potentiellen Baueignung (Fuzzy-Bewertung, Gamma = 0,6)

Abb. 3.2-9: Bewertungsoberfläche der Baueignung (Gebietsausschnitt)

Abb. 3.2-10: Bewertung der potentiellen Baueignung (Fuzzy-Bewertung, Gamma = 0,6)

Abb. 3.3-1: Hierarchie des Großtrappenhabitats

Abb. 3.3-2: Hierarchie des Schleiereulenhabitats

Abb. 3.3-3: Zugehörigkeitsfunktion

Abb. 3.3-4: Verknüpfung in einem Fuzzy-System

Abb. 3.3-5: Beispieltabelle für das Neuronale Netz

Abb. 3.3-6: Lernen mit Neuronalen Netzen

Abb. 3.3-7: Habitat als Funktion von fortpf und nahr, Parameter gefahr = 0.5

Abb. 3.3-8: Habitat als Funktion von nahr und gefahr, Parameter fortpf = 0.8

Abb. 3.5-1: Kartenausschnitt L-4550-M Hoyerswerda

Abb. 3.5-2: Lage und Gliederung des Westlausitzer Hügel- und Berglandes

Abb. 3.5-3: Bewertungsschema der natürlichen Erosionsneigung im Untersuchungsgebiet

Abb. 3.5-4: Bewertungsschema der aktuelle Erosionsgefährdung für Ackerland

Abb. 3.5-5: Ausschnitt (Seite 2) des Dokumentationsblattes der Mikrogeochore 4550-13 (Bröthener Platte)

Abb. 3.5-6: Programmausschnitt zur Fuzzy-Bewertung mit dynamischer Inzidenz und Maximumaggregation

Abb. 3.5-7: Erosionsbewertung im Untersuchungsgebiet Westlausitz, Varianten mit und ohne Lageinferenz

Abb. 3.5-8: Erosionsbewertung im Untersuchungsgebiet Westlausitz, Darstellung mit Fuzzy-Möglichkeitswerten

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.2-1: Vergleich von polyfunktionaler und multifunktionaler Landschaftsbewertung (Überblick)

Tab. 1.3-1: Bilanz des Diversität der Sekundären (D) und der Primären Landschaftsstruktur (Db) in vier Untersuchungsräumen im Raum Halle-Leipzig (in 100 m/ha) (MEYER 1997)

Tab. 1.3-2: Einstufung der Notwendigkeit von Maßnahmen zur Landschaftsdiversitätsverbesserung in Agrarlandschaften (A) und Agrarlandschaften mit geringem Waldanteil (AW) (MEYER 1996)

Tab. 1.3-3: Für regionale Landschaftsstrukturbewertungen verwendete Datenebenen im GIS in vier Untersuchungsräumen (MEYER 1997)

Tab. 1.4-1: Entwicklung der NKA wasserbezogener Projekte in den U.S.A.

Tab. 3.1-1: Gruppierung der neun Thermotoptypen

Tab. 3.4-1: Bewertung der Grundwasserschutzfunktion

Tab. 3.4-2: Anpassung von Bewertungsverfahren (nach Tab. 3.4-1) und Eingangsdaten

Tab. 3.4-3: Möglichkeitswerte der Bodenarten für ausgewählte Landschaftseinheiten

Tab. 3.4-4: Möglichkeitswerte der Grundwasserabstände für ausgewählte Landschaftseinheiten

Tab. 3.4-5: Bewertung der Grundwasserschutzfunktion mit dem Minimumoperator

Tab. 3.5-1: Auszug aus der Fuzzy-Merkmalsdatei zur Hangneigung des Untersuchungsbietes Westlausitz

Tab. 3.5-2: Bewertung der natürlichen Erosionsneigung ohne Lagekorrektur, Aggregation Summen

Tab. 3.5-3: Bewertung der natürlichen Erosionsneigung ohne Lagebeziehungen, Aggregation Maxima

Tab. 3.5-4: Bewertung der natürlichen Erosionsneigung mit dynamischem Inzidenzoperator, Aggregation Summen

Tab. 3.5-5: Bewertung der natürlichen Erosionsneigung mit dynamischem Inzidenzoperator, Aggregation Maxima

Tab. 3.5-6: Bewertung der aktuellen Erosionsgefährdung mit dynamischem Inzidenzoperator, Aggregation Summen

Landschaftsbewertung und Leitbildentwicklung - Zum Stand der landschaftsökologischen Forschung am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle

Rudolf Krönert

Die Sektion Angewandte Landschaftsökologie ist dem Gründungsauftrag des Umweltforschungszentrums Leipzig-Halle GmbH verpflichtet, mit ihren Forschungen die Regenerierung und Erhaltung von Landschaften vor allem in stark belasteten Ballungsräumen zu unterstützen. Die Aufgabenstellung im einzelnen wird mit dem wissenschaftlichen Fortschritt und den Anforderungen an die Umweltforschung ständig präzisiert, wie dies seinen zusammenfassenden Ausdruck im Programmentwurf zur Umweltforschung der Bundesrepublik Deutschland 1997 und im Forschungs- und Entwicklungsplan des UFZ 1997/98 findet. Seit „Anfang der neunziger Jahre wandte sich die Forschung einem raumbezogenen, landnutzungsorientierten Forschungsansatz" zu. Dessen „Ziel ist es, die Flächen- und Raumstruktur sowie die Landnutzung so zu gestalten, daß die Leistungsfähigkeit des Naturhaushaltes und die biologische Vielfalt gesichert bzw. wiederhergestellt werden können". „Notwendig für diesen neuen Forschungsansatz ist die Erarbeitung von Umweltzielen, die dann Ausgangspunkt für Konzepte als Grundlage künftigen Handelns sind" (S. 16, S. 18 , Forschung für die Umwelt, Programmentwurf, 02.04.1997). „Das zentrale Forschungsthema am UFZ bleibt nach wie vor die 'nachhaltige Gestaltung von Kulturlandschaften', wobei ein regionaler, landschaftsbezogener Forschungsansatz zugrunde liegt. Folglich bilden Urbane Landschaften, Bergbau- und Industrielandschaften, Naturnahe Landschaften und Ländliche Räume sowie Flußlandschaften auch weiterhin den Fokus der UFZ-Forschung. ... Gefordert wird für alle Landschaften ein Verständnis der Funktion, Struktur und Dynamik der dominierenden Ökosysteme. Darauf aufbauend werden für den jeweiligen Kulturlandschaftsyp Leitbilder und spezifische Umweltqualitätsziele entwickelt." (UFZ, FuE-Programm 1997/98 05.06.1997).

Die genannten Ziele lassen sich ohne Landschaftsbewertung nicht verwirklichen, die sich als ein Arbeitsschwerpunkt der Sektion Angewandte Landschaftsökologie herausgebildet hat.

Landschaftsbewertungen setzen immer die Bestimmung und Abgrenzung der Bewertungsobjekte („Landschaften"), der Bewertungsziele und der Wertmaßstäbe, der räumlichen Dimension der Bewertungsobjekte sowie der Zeiträume, auf die sich die Bewertung bezieht,

voraus. Um der Vielfalt und Kompliziertheit der Landschaftsbewertung gerecht zu werden, ist die Integration von landschaftsökologischen und sozioökonomischen Aspekten unumgänglich.

Zahlreiche Mißverständnisse in der Landschaftsforschung und damit in der Landschaftsbewertung sind dadurch entstanden, daß die zwei Grundkategorien von „Landschaften", nämlich Naturräume und Landschaftsräume nicht eindeutig gedanklich voneinander unterschieden werden. Real existent sind Landschaftsräume als natürlich-technische Kategorie. Sie stellen eine Einheit und Ganzheit von natürlichen Geosystemen, technischen Objekten und Landnutzung dar. Ihre Abgrenzung erfolgt nach der Landnutzung sowie nach dem Komplex der natürlichen Geokomponenten und Prozesse. Naturräume als natürliche Kategorie sind eine wissenschaftliche Abstraktion aus den Landschaftsräumen und werden nach dem Komplex der natürlichen Geokomponenten und Prozesse bestimmt und abgegrenzt. Die Bewertung von Naturräumen zielt auf die Bestimmung von Naturraumpotentialen als Dargebot für Nutzungen und den Schutz, auf die Bestimmung der Tragekapazität für Nutzungen sowie auf die Belastbarkeit, die Stabilität und Resilienz von Geosystemen bei Nutzungen. Die Bewertung von Landschaftsräumen sucht Antwort darauf, wie gut oder schlecht Landschaftsfunktionen (Regulationsfunktionen, Produktionsfunktionen, Trägerfunktionen und Informationsfunktionen) bei gegenwärtigen Nutzungen erfüllt werden oder bei anzustrebenden Nutzungen erfüllt werden können.

Landschaftsbewertung ist eine sich ständig wiederholende Aufgabenstellung, weil die Erkenntnisse zum Landschaftshaushalt fortschreiten und neue Einsichten über Nutzungen und Nutzungsgrenzen entstehen und zum anderen, weil sich die Anforderungen der Gesellschaft an die Natur regional differenziert verändert und die Akzeptanz des Landschaftsschutzes hoffentlich zunimmt. Die gesetzten oder zu setzenden Wertmaßstäbe werden in der Reihenfolge Leitbild - Umweltqualitätsziel - Umweltziel - Umweltstandard zunehmend schärfer gefaßt. Während Leitbilder für die Landschaftsentwicklung meist nur die von einem Landschaftsraum zu erfüllenden Funktionen angeben, werden in den Umweltqualitätszielen qualitative Merkmale angegeben (Fische aus der Elbe sollen wieder eßbar sein; Hartholzauen im Biosphärenreservat Mittlere Elbe sollen erhalten und vergrößert werden) und in Umweltzielen quantitative Aussagen gemacht (der Bodenabtrag pro Hektar Ackerland soll im Jahresmittel 5 Tonnen nicht überschreiten; die Vorrangflächen für Naturschutz sollen 10-15 % der Gesamtfläche einer Landschaftseinheit betragen). Umweltstandards geben einzuhaltende Grenz- und Richtwerte an, die nicht überschritten werden dürfen, bzw. die eingehalten werden

müssen. Die Zeithorizonte für Landschaftsbewertungen sind unterschiedlich lang. Leitbilder sollten zur Einhaltung des Nachhaltigkeitsprinzips für die Langfrist konzipiert sein. Umweltstandards sind ständig einzuhalten oder in einer nahen Zukunft zu erfüllen. Umweltqualitätsziele und Umweltziele werden für mittelfristige Zeiträume (10 - 25 Jahre) formuliert.

Weil Landschaftsräume in aller Regel mehrere Funktionen gleichzeitig erfüllen, sollte die Landschaftsbewertung holistisch sein, d. h. mehrere Funktionen in ihrem Erfüllungsgrad, in ihrer Kongruenz und Koinzidenz, gleichzeitig berücksichtigen. Das ist eine außerordentlich schwierige Aufgabe. Die Auswahl der jeweils zu berücksichtigenden Landschaftsfunktionen verlangt äußerste Sorgfalt und kann von der Wissenschaft allein nicht erfolgen. Neben wissenschaftlichen Einsichten z. B. zur Erhaltung der Bodenfunktionen oder zum Schutzes von Arten und Biotopen sind die Nutzungsinteressen der Landeigentümer und -nutzer, der Kommunen, Kreise und Länder u. a. zu berücksichtigen. Ein sorgfältiges Studium der Planungsunterlagen zur Regional- und Landschaftsplanung, die zahlreiche Leitbildaussagen und Aussagen zu Umweltzielen enthalten, sollte selbstverständlich sein. Wenn wir der polyfunktionalen Landschaftsbewertung den Vorzug geben, bedeutet dies nicht, daß die auf Einzelfunktionen und die Nutzung einzelner Naturraumpotentiale gerichteten Bewertungen nicht notwendig wären, zumal hierbei oft ein direkter Bezug zu Fachplanungen hergestellt werden kann. Der Sinn der polyfunktionalen Bewertungsansätze besteht jedoch darin, Neben- und Folgewirkungen von Nutzungen rechtzeitig zu erkennen und diese entweder zu vermeiden oder bewußt auszunutzen. Die polyfunktionale Landschaftsbewertung von Landschaftseinheiten, die auf der Bewertung von Landschaftselementen aufbaut, erfordert außerordentlich umfangreiche Datensätze und tiefgründiges Wissen über die Struktur und Prozesse von elementaren Ökosystemen. Die Entwicklung neuer mathematischer Verfahren, die es erlauben, auch bei unsicherer und unvollständiger Datenlage Aussagen über die Eignung, Leistung und Belastbarkeit von Landschaften zu formulieren , ist eine wesentliche Voraussetzung, um Fortschritte in der landschaftsökologischen Bewertung zu erzielen.

1 Ökologische Landschaftsbewertungen - Entwicklung, Probleme, Beispiele

1.1 Entwicklung, Stand und Perspektiven der Landschaftsbewertung

Eckhard Müller und Martin Volk

1.1.1 Einleitung

Das Spannungsverhältnis zwischen Beherrschung und Bewahrung der Umwelt läßt sich im abendländisch-christlichen Kulturkreis bis zu alttestamentarischen Quellen zurückverfolgen: 1. Mose 1.28. : „Seid fruchtbar und mehret euch und füllet die Erde und macht sie euch untertan,..." und 1. Mose 2.15.: „ Und Gott der Herr nahm den Menschen und setzte ihn in den Garten Eden, daß er ihn baute und bewahrte." Hier können wohl die Wurzeln einer anthropozentrischen Umweltsicht geschen werden. Mit spürbarer Inanspruchnahme der Landschaft bzw. ihrer Kompartimente durch den Menschen erfolgt zunehmend eine Bewertung ihrer Eignung, der Folgen ihrer Benutzung oder gar Ausbeutung bis hin zur Schutzwürdigkeit und Gestaltung, was durch die Komplexität der Landschaft eine besondere Problematik darstellt.

1.1.2 Grundlagen für die landschaftsökologische Bewertung

Die Diskussion um den Begriff bzw. um die Definition von *Landschaft* prägte über Jahrzehnte hinweg die Entwicklung der Landschaftsökologie in der Geographie. Diese Diskussion hatte aber auch wesentliche Fortschritte für die Entwicklung der *Landschaftsbewertung*, bzw. der Frage nach dem *Wert der Umwelt*, als Kern der landschaftsökologischen Fragestellung zur Folge. Daher soll zunächst kurz auf das Verständnis von Landschaft und Bewertung eingegangen werden.

Verständnis von Landschaft. Einen wichtigen Punkt bildete bei der Diskussion um den Landschaftsbegriff die Frage, ob es sich bei der Landschaft um ein Individuum oder einen Typ handelt (vgl. PAFFEN 1953; SCHMITHÜSEN 1964). Für die Landschaftsphysiologie (PASSARGE 1912) bildete die Landschaft die Synthese einer Vielzahl von Einzelelementen - in der Naturräumlichen Gliederung lehnte man sich dieser Vorstellung später wieder an. Die Synthese sollte somit auch für die Landschaftsökologie eine zentrale Bedeutung erlangen.

Ein weiterer wichtiger Faktor wurde innerhalb der Diskussion um den Landschaftsbegriff für die Geographie als "Raumwissenschaft" behandelt: die Dimension. TROLL (1950) definiert Kleinlandschaften als typische räumliche Anordnungen von Physiotopen- und Ökotopen zu einem Mosaik, wobei bei dieser Definition die kleinsten räumlichen Einheiten (Physiotope und Ökotope) selber also nicht berücksichtigt werden. NEEF (1967a) stellt dem gegenüber, daß die Größe und die damit zusammenhängende Ausgliederung von Ganzheiten kein Definitionsmerkmal der Landschaft sein könne (vgl. auch CAROL 1957). NEEF (1967a) versteht unter Landschaft "einen durch einheitliche Struktur und gleiches Wirkungsgefüge geprägten konkreten Teil der Erdoberfläche". Diese Definition schließen sich wohl bis heute - mit geringen Abweichungen - die meisten Fachleute an, da sie in ihrer Aussage den Kern der landschaftsökologischen Betrachtungsweise trifft.

Es muß jedoch festgehalten werden, daß diese innerhalb der Geographie geführte Diskussion um ihren zentralsten Begriff bei den Nachbardisziplinen eher Verwirrung als Klärung herbeigeführt haben könnte (FINKE 1994). Aus diesem Grund sollte den Fragen der Allgemeingültigkeit, der zeitlichen Abhängigkeit und des Genauigkeitsanspruches von Bewertungen entsprechend den theoretischen Aussagen von NEEF (1967a): „ Geographische Landschaft ist ein *Kompositum*, ein sich aus *verschiedenen Bildungsprozessen* und *verschiedenen Kausalzusammenhängen* ergebendes materielles System." „ Alle geographischen Systeme existieren in *Raum* und *Zeit*." „ Alle geographischen Grenzen sind *Grenzen im Kontinuum*." „... sie sind *Linien* oder *Säume* des Gestaltwandels." Beachtung geschenkt werden.

Verständnis von Bewertung. Bewertung setzt das Vorhandensein eines wertenden Subjekts und eines bewerteten Objekts voraus, die miteinander in einer Beziehung stehen (in unserem Falle : Wechselwirkung Gesellschaft - Natur). Das Bewertungsobjekt (hier die Landschaft) wird in den meisten Fällen nicht in seiner Totalität sondern über ein Modell erfaßt. Diese notwendige Komplexitätsreduktion kann in einer Zeit- bzw. Kapazitätslimitierung, einer Erfassungs- und Erkenntnislimitierung des Subjektes begründet sein. Je nach Bewertungsziel kann derselbe Bewertungsgegenstand unterschiedliche Bedeutung haben. Eine sinnvolle Abstimmung des räumlichen Bezuges (Maßstab) ist erforderlich.

Wie jedes Lebewesen war und ist der Mensch auf seine Umwelt bzw. auf die Natur als Lebensraum angewiesen. Er nahm "*Bewertungen*" vor, in dem er "Gunst"-Orte auswählte, die ihm sein Überleben gewährleisteten und sein Dasein erleichterten, also einen besonderen *Wert*

für ihn darstellten. Die ständige Suche nach Verbesserungen und Erleichterungen hatte auch den stetigen Ausbau von Kommunikations- und Verbindungswegen zur Folge, so daß sich die Möglichkeiten des Handels, des gewinnbringenden Wirtschaftens entwickelten - und zu einer "schleichenden" *Änderung des Wertbegriffes* führten. Daher hatten bis in die 70er Jahre hinein Landschaftsbewertungen größtenteils das Ziel einer zweckmäßigen, ökonomischen Nutzung der Landschaft und waren auf Ertragssteigerung und effektiven Ressourcenabbau etc. ausgerichtet - dies führte unter anderem zu einer Intensivierung der Landnutzung. Wenig beachtet wurde dabei jedoch, daß die einseitige Nutzung großer Landschaftsteile die Funktionsweise von Ökosystemen stark beeinträchtigt und zudem negative Auswirkungen auf das Landschaftsbild zur Folge hat.

Seit etwa den frühen 70er Jahre wurden verstärkt Verfahrensansätze für *ökologische Bewertungen* entwickelt. Dabei werden räumliche Strukturen, Nutzungen, Funktionen und Potentiale im Hinblick auf das Leistungsvermögen des Naturhaushaltes der Landschaft beurteilt. KIAS & TRACHSLER (1985) erwähnen allerdings, daß ökologische Bewertungsverfahren immer angreifbar sind, "da die wirklichen Systemzusammenhänge viel komplexer sind als ihre Abbildung im Bewertungsverfahren." Dadurch wird das Problem von Landschaftsbewertungen im allgemeinen deutlich, da sie immer mit anthropogenen Eingriffen in den Naturhaushalt in Zusammenhang stehen. Diese Eingriffe zwingen dann dazu, die im Sinne der Natur eigentlich "wertfreien" Ökosysteme zu *bewerten.*

1.1.3 Nutzungsbezogene Bewertung von Landschaftskomponenten

Besonders Land- und Forstwirtschaft, Fachgebieten, in denen ökologisches Wissen zum Tragen kommt, entwickelten schon relativ früh sehr ausgefeilte Eignungsbewertungsverfahren (vgl. FINKE 1994). Diese Bewertungsverfahren waren jedoch eher auf ökonomische Aspekte orientiert. Auch die in den "reinen" Forschungseinrichtungen entwickelten Verfahren konzentrierten sich vorwiegend auf die *nutzungsbezogene Bewertung von Landschaftskomponenten*, wobei hier aber schon einige ökologische Sichtweisen einflossen.

Zur Bewertung der aufgrund ihrer Eigenschaften als Steuergröße im Landschaftshaushalt wichtigen Komponente *Relief* wurden von den 60er bis in die 80er Jahre hinein zahlreiche Ansätze entwickelt. Dabei handelt es sich um Verfahren, die eine geomorphologische Charakterisierung von Gebieten (z.B. Landkreise) erlauben und eine (geomorphologische) Regionalgliederung ermöglichen. Hier ist hauptsächlich auf die Arbeiten von KUGLER (1977) zur

geomorphologischen Reliefcharakteristik und die Arbeiten zum DFG-Schwerpunktprogramm "Geomorphologische Karte 1:25.000 der Bundesrepublik Deutschland" (vgl. z.B. BARSCH et al. 1978) hinzuweisen. Beide Methoden ermitteln aus der genetischen und skulpturellen Erfassung des Georeliefs die für geoökologischen Fragestellungen relevanten Informationen, wobei sie mögliche Anwendungen für die Praxis geben. Als Beispiele seien hier die Beurteilung des Einsatzes moderner technischer Geräte in der Land- und Forstwirtschaft, der Disposition von Wirtschaftsflächen zur Bodenerosion, des Bebauungspotentials und die Dynamik zur Abflußbildung genannt. Enthalten sind auch Bewertungen zur Erholungseignung hinsichtlich psychischer und physischer Reizwirkungen durch das Georelief. Trotz der Vereinfachungen und Systematisierungen der genannten Verfahren und der Forderung KUGLERS (1977) nach einer "geoökologischen Geomorphologie", wurden die Erwartungen der Autoren bezüglich einer vermehrten Anwendung geomorphologischer Kartenwerke in der Praxis größtenteils nicht erfüllt. Dies mag wohl an einer noch immer oftmals zu fachspezifischen Betrachtungsweise und schweren "Lesbarkeit" der Karten liegen (vgl. dazu auch FINKE 1980).

Die Landschaftskomponente *Boden* besitzt durch ihre Funktion als Lebensraum für Organismen und Pflanzen als Standort und Nährstofflieferant, Stofftransformator und Transportmedium, Filter und Puffer *die* zentrale Stellung im Landschaftshaushalt. NEEF, SCHMIDT & LAUCKNER (1961) bezeichnen daher zu Recht den Bodentyp, neben dem Bodenfeuchteregime und der Vegetation, als ein *ökologisches Hauptmerkmal (ÖHM)"*. Aufgrund der wirtschaftlichen Bedeutung des Bodens ist es nicht verwunderlich, daß schon früh ein ausgeklügeltes Bewertungsverfahren wie die *Reichsbodenschätzung* (1935 bis nach 1945) entwickelt wurde, die in der Literatur "als Vorläufer heute üblicher kombinierter Verfahren" angesehen wird. Dabei wurde nach einen einheitlichen Schlüssel (ROTHKEGEL 1950) eine umfassende Analyse und Bewertung des natürlichen Produktionspotentials durchgeführt und somit die landwirtschaftliche Anbaufläche des gesamten damaligen Deutschen Reiches erfaßt.

FINKE (1994) betont, daß die Ergebnisse der *Reichsbodenschätzung* "auch heute noch wesentliche Aussagen speziell zur bodenkundlichen, darüber hinaus zur allgemeinen landschaftsökologischen Situation eines Gebietes zu geben vermögen" (vgl. auch ARENS 1960, MERTENS 1964)". Wie Arbeiten z. B. von HEINEKE et al. (1986) zeigen, werden diese Daten auch zunehmend in digitalen Kartenwerken für ökologische Fragestellungen ausgewertet und verwendet. Dennoch zeigen BASTIAN & SCHREIBER (1994) Mängel bei der Verwendung der Bodenschätzung auf, die sich hauptsächlich auf die "fehlende Aktualität" der Bodenschätzung bezie-

hen. Aufgrund der mangelnden Laufendhaltung in den Neuen Bundesländern fehlt ihrer Meinung nach zwangsläufig der seither erzielte Erkenntniszuwachs. Damit bleiben die später durchgeführten Maßnahmen der Landeskultur (wie Boden-, Hydro- und Reliefmelioration) unberücksichtigt. Allerdings wurden bis in die 70er und 80er Jahre standortkundliche Ergänzungen der Bodenschätzung (inklusive Geländeerhebungen) durchgeführt. In den alten Bundesländern ist sie durch von Finanzamt bestellte Bodenschätzer bis heute fortgeführt und aktualisiert worden.

In der DDR wurde mit der *Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK)* (1976 bis 1982) versucht, Beurteilungsgrundlagen für eine standortsgerechte Bodennutzung der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche zu schaffen. Durch die Ergebnisse der MMK lassen sich heterogene Standortseinheiten durch die Substrat-, Boden- und Bodenwasserverhältnisse, die Struktur der Bodendecke und der Reliefverhältnisse charakterisieren (vgl. z. B. SCHMIDT & DIEMANN 1981) und Bewertungen für die Planung der industriemäßigen Pflanzenproduktion ableiten (LIEBEROTH 1980).

1952 beginnend wurde die *forstlichen Standortskartierung* (der DDR, Maßstab 1:10.000, KOPP 1975, SCHWANECKE 1983) durchgeführt, wobei die dargestellten forstlichen Standortsformen auf der Verknüpfung von Boden-, Substratwasser-, Relief- und Klimaformen beruhen und Zusammenhänge mit der Vegetationsform herausgearbeitet werden. In den Erläuterungen werden wichtige Kennwerte und Zusammenhänge dieser Komponenten dargestellt. Ziel der forstlichen Standortserkundung ist es, im weitesten Sinne eine Beurteilungsbasis für die standortsgerechte waldbauliche Planung (Baumwahl nach Bestockungszieltypen, Aufforstungsverfahren, Düngungsempfehlungen, Meliorationen), also vorrangig zum biotischen Ertragspotential bereitzustellen. Leider hat sich die Forstliche Standortskartierung in den einzelnen Ländern eigenständig entwickelt und trägt „trotz einer Kartieranleitung des AK Standortskartierung weiterhin sehr individuelle, länderbezogene Züge" (BASTIAN & SCHREIBER 1994).

Rein auf die Erfassung der natürlichen Ressourcen (Rohstoffe) zielt dagegen die Naturraumpotentialerfassung von DANIELS & LÜTTICH (1982) sowie die Kartierung der Geologischen Landesämter in der Bundesrepublik Deutschland (vgl. auch BARSCH & RICHTER 1983). Das dies nicht immer vorteilhaft ist, zeigen z. B. die landschaftsökologischen Probleme in den Braunkohletagebaugebieten der ehemaligen DDR. Auch mit dem Abbau von Baustoffen und

anderer natürlicher Ressourcen sind eine Reihe unmittelbar landschaftsökologisch relevanter Begleiterscheinungen eng verknüpft.

Neben ihrer Bedeutung als Rohstofflagerstätten haben *Böden und Gesteine* durch ihre Durchlässigkeit gegenüber Schadstoffen aber auch für die Auswahl von Deponiestandorten eine besondere Bedeutung. Die fachlichen Diskussionen und Auseinandersetzungen um Vermeidung und Verwertung des immer stärker steigenden Abfallaufkommens, um geeignete Deponiestandorte, in Zusammenhang damit das sich im Laufe der Jahre herausbildende Umweltbewußtsein der Gesellschaft, führten schließlich zur Entwicklung der Technische Anleitung (TA) Abfall (01.04.1991) und der TA Siedlungsabfall (14.05.1993). Diese Anleitungen setzen die strenge Kriterien für die Einrichtung von oberirdischen Deponien fest.

In *Oberflächengewässern, Bodenwasser* und *Grundwasser* laufen die wesentlichen Stoff- und Energietransporte zwischen den landschaftlichen Ökosystemen ab (vgl. z. B. HERMANN 1977). Eine Übersicht der aufgrund der ökologischen Bedeutung großen Fülle an Verfahren und Parameter, die zur Charakterisierung von Morphometrie, Hydrologie, Einzugsgebiet und Belastung der Gewässer herangezogen werden, ist bei BASTIAN & SCHREIBER (1994) dargestellt. Diese Verfahren und Parameter werden auch zur Einschätzung der Wasserqualität sowie der Belastung und Belastbarkeit herangezogen und sind z. T. in den Verfahren zur Beschreibung *von Wassergüte bzw. ökologischem Gewässerzustand* enthalten. Als allgemein bei Gewässern anwendbare Verfahren wären zu nennen Arten-/Mannigfaltigkeitsindizes, Artenfehlbetrag, Halobienindex, Hemerobie und andere biologische Verfahren. Als bekanntester, fließgewässertypischer Güteparameter - neben dem Aussagewert von Einzelorganismen und dem Makroindex - kann wohl der Saprobienindex angesehen werden. Anhand von Bewertungstabellen läßt sich der ökomorphologische Natürlichkeitsgrad eines Fließgewässers beurteilen (vgl. WERTH 1987). GIESSÜBEL (1993) beschreibt ein auf den Naturschutz ausgerichtetes System zur Erfassung und Bewertung von Fließgewässerstrukturen aus Luftbildern. Die Beurteilung eines Sees oder anderen großen Stillgewässers kann über die Sauerstoffverhältnisse, Nährstoffbedingungen und über die in ihm lebenden Organismen erfolgen. Die Auswahl an weiterführender Fachliteratur zur Kennzeichnung von Oberflächengewässern ist fast unüberschaubar geworden, als Überblick seien mit SUCCOW (1991), FRIEDRICH & LACOMBE (1992), KLAPPER (1992) und SCHÖNBORN (1992) nur einige aufgeführt.

Das *Bodenwasser* erfüllt aufgrund seiner jahreszeitlichen Veränderlichkeit die bedeutende ökologische Funktion eines Reglers (z.B. Stofftransport). Aus diesem Grund wurden zahlreiche Verfahren zur Bestimmung bzw. Beurteilung der nutzbaren Feldkapazität des Bodens, des ökologischen Feuchtegrades, der Grundwasserneubildung, der Wasserdurchlässigkeit des Bodens etc. entwickelt. Dabei handelt es sich einerseits um Verfahren, bei denen diese ökologisch bedeutsamen Parameter im weitesten Sinne über das Substrat bzw. die Bodenart ermittelt (vgl. z.B. AG BODEN 1994, THOMAS-LAUCKNER & HAASE 1967) und je nach Parameter den Boden unterschiedlichen Zustandstufen zugeteilt werden (vgl. z.B. MARKS et al. 1992). Andererseits wurden Methoden entwickelt, die eine Ableitung wichtiger ökologischer Parameter des Bodens über Vegetationsaufnahmen erlauben, bzw. die Indikation von Bodeneigenschaften mittels ökologischer Zeiger- bzw. Weiserpflanzen ermöglichen (vgl. z.B. ELLENBERG 1991, KUNZMANN 1989).

Zahlreiche Studien beschäftigen sich mit der Bewertung der Komponente *Klima*. Neben rein klimatologischen Fragestellungen wird in den landschaftsökologischen Arbeiten versucht, die Wechselwirkungen des Klimas mit den anderen Teilen des Landschaftshaushaltes zu bestimmen und zu bewerten. In - im weiteren Sinne - bioökologischen (z. B. ELLENBERG 1982, SCHMITHÜSEN 1968), landwirtschaftlichen (z. B. UHLIG 1954), stadtklimatologischen Untersuchungen (z.B. ARBEITSGRUPPE FREIBURG 1974, JACOBEIT 1996) und im Rahmen von z. B. Erholungseignungsverfahren und anderen Planungsfragen (z. B. KNOCH 1963) werden Klimaelemente hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Nutzungseignung und/oder ihrer ökologischen Wirkung bewertet. Leider stehen Informationen z.B. zum Geländeklima für Planungen meist nicht zur Verfügung, eine Ausnahme bildet hier der Ballungsraum Ruhrgebiet (vgl. KLINK 1990, KVR 1990).

In bezug auf die Bewertung der Landschaftskomponente *Vegetation* sei als Beispiel auf die Arbeiten von SCHLÜTER (1985, 1991) verwiesen. Da die Vegetation je nach Art und Intensität der Nutzung und Belastung einen unterschiedlichen Natürlichkeitsgrad aufweist, der den Grad des menschliches Einflusses auf Ökosysteme aufzeigt, ist sie bedeutungsvoll für die ökologische Bewertung von Ökotopen bzw. Landschaften. Die von SCHLÜTER (1991) verwendete neunstufige Skala des Natürlichkeitsgrades der Vegetation ermöglicht eine vegetationsökologische Bewertung der Auswirkung aller Nutzungsarten verschiedener Intensität auf die Vegetation für Flächen einheitlicher Nutzung und deren Kartierung in großen Maßstäben. Unter Verwendung von Flächennutzungskarten, Luft- und Satellitenbildern ist jedoch auch die

Erfassung und Kartierung des aktuellen ökologischen Vegetationszustandes mit vertretbarem Aufwand für größere Gebiete möglich.

Gemäß z.B. UVP-Gesetz, Bundesnaturschutzgesetz ist es gesetzlich vorgeschrieben, *Tiere* in ihrer Rolle als Indikatoren bestimmter Umweltzustände stärker in landschaftsökologische Arbeiten einzubeziehen. Neben ihrer Mobilität, ihrer versteckten Lebensweise und ihre oftmals unbekannten ökologischen Ansprüche im Vergleich zur Vegetation ist es jedoch "bedingt durch die große Artenvielfalt sowie finanzielle, personelle und zeitliche Schwierigkeiten i.d.R. ausgeschlossen, selbst für kleine Areale einen annähernd umfassenden Überblick über die Tierwelt zu bekommen. Deshalb muß man stellvertretend bestimmte Arten- oder -gruppen auswählen" (vgl. BASTIAN & SCHREIBER 1994, ZUCCHI 1990). Umfassende Darstellungen zu den methodischen Standards zur Erfassung von Tierartengruppen bei ökologischen Gutachten liefern z. B. TRAUTNER (1992) und REINKE (1993). LESER (1991b) kritisiert an den Bewertungsverfahren, daß sie sehr selektiv ansetzen und damit die Gesamtraumfunktion weder erfassen noch darstellen können. FINKE (1994) weist jedoch darauf hin, daß dies jedoch von den "Bewertern" "sogar ausdrücklich angestrebt" wird, da nur das erfaßt, bewertet, gewichtet und zu einer Gesamtaussage aggregiert wird, was im Sinne der jeweiligen Fragestellung relevant erscheint. Er weist aber auch darauf hin, daß verbesserte Kenntnisse über den gesamten Systemzusammenhang zur Auswahl der richtigen Indikatoren und zu deren Verknüpfung zu einem Urteil über Eignung, Schadwirkung, Gefährdung, Schutzwürdigkeit, u.s.w. benötigt werden.

1.1.4 Integrative Bewertung landschaftshaushaltlicher Funktionen und Potentiale

Im Sinne von LESERS (1991b) Kritik, also hin zu einer Erfassung und Bewertung der Gesamtraumfunktion, wurde bereits in den frühen siebziger Jahren immer stärker gefordert, in bezug auf die Prioritäten der räumlichen Entwicklungen auch die ökologischen Gegebenheiten in Bewertungen und Planungen miteinzubeziehen (vgl. BUCHWALD & ENGELHARDT 1980).

Aufbauend auf der Übernahme des Potentialbegriffes in die Landschaftslehre (Landschaftspotential) durch NEEF (1966, 1969) erfolgte durch HAASE (1978) eine Differenzierung spezifischer Leistungsmöglichkeiten des Naturraumes in sogenannte partielle Naturraumpotentiale (biotisches Ertragspotential, Wasserdargebotspotential, Entsorgungspotential, biotisches Regulationspotential, geoenergetisches Potential, mineralisches Rohstoffpotential, Bebauungs- und Rekreationspotential). Für zahlreiche Beispielsbearbeitungen seien stellver-

tretend genannt: Bebauungspotential (HRABOWSKI 1978), Entsorgungspotential (WEDDE 1983), Wasserdargebotspotential (MÜLLER 1984). MANNSFELD (1983) schlägt einen Algorithmus zur Bestimmung der Naturraumpotential-Eigenschaften von Landschaftsräumen vor, der von der Auswahl der Indikatoren über deren Bewertung bis hin zur Ermittlung von Eignungsrangfolgen von Naturraumeinheiten für ein partielles Naturraumpotential reicht. Potentialvergleiche (BARSCH & SCHÖNFELDER 1983) erlauben Aussagen zu Formen der Mehrfachnutzung und möglichen Konflikten.

Landschaftsfunktionen. Als Grundlage für die Landschaftsbewertung können auch die *Natur-* oder *Umweltfunktionen* angesehen werden. DE GROOT (1992) definiert sie als die Kapazität natürlicher Prozesse und Komponenten, Waren und Leistungen bereitzustellen, die menschliche Bedürfnisse direkt oder indirekt erfüllen. Dabei unterscheidet er die "*Naturfunktionen*" in die vier Kategorien Regulationsfunktionen, Trägerfunktionen, Produktionsfunktionen und Informationsfunktionen. Diese Kategorien werden jeweils mit mehreren Funktionen beispielhaft belegt.

Nach BASTIAN & SCHREIBER (1994) führt "erst die Integration [von naturräumlicher und landschaftsräumlicher Betrachtungsweise] dazu, die durch eine teilweise jahrhundertelange Nutzungstätigkeit der Gesellschaft geprägten Naturräume als Landschaftsräume anzusprechen und Landschaftseinheiten als synthetische Einheiten zur Bestimmung der Funktionsfähigkeit zu verwenden." Der Bewertung der Landschaftsstruktur entstammt die Bezeichnung *Landschaftsfunktionen.* BASTIAN (1991) untergliedert folgende Funktionsgruppen: Produktionsfunktionen (ökonomische Funktionen), Regulationsfunktionen (ökologische Funktionen) und Lebensraumfunktionen (soziale Funktionen), die er weiter untergliedert, so daß die "einzelnen Wirkungs- und Wechselbeziehungen zwischen den Nutzungsanforderungen einerseits und der Landschaftsstruktur andererseits erkennbar werden".

Nach MARKS et al. (1992) setzt sich das Leistungsvermögen des Landschaftshaushaltes aus der Summe seiner *Funktionen* und Potentiale zusammen. Dabei schlagen sie vor, grundsätzlich für die Aufgaben und Leistungen des Landschaftshaushaltes den Begriff "Funktion" (Boden/Relief, Wasser, Klima/Luft, Biotische Funktion, Erholung) zu benutzen, während der Terminus "Potential" auf das "Naturraumpotential" und reale Objekte (z.B. Relief der Landschaft) beschränkt bleiben, bzw. wegen seiner Ressourcenorientiertheit (vgl. DANIELS & LÜTTICH 1982) und der dadurch bedingten Verwechselungsmöglichkeiten bei ökologischen

Bewertungen und Planungen nicht mehr verwendet werden sollte (vgl. dazu auch BASTIAN & RÖDER 1996). Insgesamt ist bei allen Autoren eine weitgehende Übereinstimmung der Funktionsgruppen zu erkennen, jedoch hinsichtlich der weiteren Untergliederung, der "Auswahl von Bestimmungsmerkmalen, der Maßstabsbezogenheit der Datenquellen und dem jeweiligen Verwendungszweck des Interpretations- und Bewertungsergebnisses läßt sich gegenwärtig noch keine vereinheitlichte Herangehensweise erkennen" (BASTIAN & SCHREIBER 1994).

Landschaftselemente, Landschaftseinheiten. Die Typisierung, Charakterisierung und Einordnung von Landschaften unter Berücksichtigung der naturräumlichen Gegebenheiten und der Landnutzung sind Grundvoraussetzung für eine nachhaltige Landschaftsentwicklung. Für die Einordnung und den Vergleich von Untersuchungsräumen werden Landschaften daher hierarchisch betrachtet. Diese Gliederung/Ordnung kann einerseits nach naturräumlichen Gegebenheiten erfolgen, anderseits ist sie auch unter der Berücksichtigung der Landnutzung möglich. So sind nach NIEMANN (1982) *Landschaftseinheiten* durch relativ stabile naturräumliche und anthropogene Faktoren abgrenzbare und in ihren Leistungen durch ein spezifisches Gefüge von Landschaftselementen gekennzeichnete Landschaftsausschnitte verschiedener Dimensionen. Die *Landschaftselemente* sind die kleinsten nach der Realnutzung, strukturellen Eigenschaften und gesellschaftlichen Auswirkungen noch abgrenzbaren Gegenstandsbereiche der Landschaft, wobei hier eine hierarische Untergliederung in homogene und heterogene Landschaftselemente in Erwägung gezogen wird. Im Gegensatz zu DE GROOT (1992), bei dem die Funktionen eher globalen Charakter tragen, sind für NIEMANN (1982) landschaftsökologische Funktionen identisch mit landschaftsökologischen Wirkungen in Verbindung mit Struktur und Lageeigenschaften - also mit konkreten Bezug zur Landschaft.

Etwa ab Mitte der siebziger Jahre erfolgte die Entwicklung von sog. "Multiverfahren", bei denen mehrere Nutzungsformen beurteilt wurden und in die nach und nach auch der Umweltschutzgedanke Eingang fand (vgl. BRAHE 1972, BISCHOFF, WELLER U. GEKLE 1974/75, BECHMANN 1977, MARKS 1979). Gegen Ende der Siebziger Jahre begann NIEMANN mit der Entwicklung eines *polyfunktionalen Bewertungssystems*. Dabei bezog er sich auf Landschaftseinheiten bzw. Landschaftselemente und erreichte damit eine Kongruenz zwischen Bewirtschaftungs- und Bewertungseinheiten. Trotz der Verwendung der Nutzwertanalyse integrierte er eine Vielzahl ökologischer Gegebenheiten. Obwohl auch hier der Nutzwert vorwiegend

durch ökonomische Gesichtspunkte definert, ist die dabei erfolgte Integration von ökologischen Gegebenheiten (z.B. Regulationsfunktionen der Landschaft) in die Nutzenbetrachtungen als positiv zu werten, ökologische Bewertungsverfahren gewannen nun immer mehr an Bedeutung (vgl. z.B. BUCHWALD & ENGELHARDT 1980). Während die genannten Autoren bei ihrer Bewertung zumeist mit Hilfe einer Punktebewertung vorgingen (die allerdings nutzwertanalytische Ansätze enthielt), so verwendete SPORBECK (1979) weiterhin die strenge Form der Nutzwertanalyse. Er analysierte und bewertete das physische Nutzungspotential zweier durch den Braunkohlebergbau beeinflußter Untersuchungsgebiete, sowohl vor dem Braunkohlenabbau als auch nach der Rekultivierung, für die Nutzungsformen Ackerbau, Forstwirtschaft und naturnahe Erholung. Auf Basis der Bewertungsergebnisse (Räume unterschiedlichen Eignungsgrades) und einem Potentialvergleich zwischen den beiden Zustandstufen der Untersuchungsgebiete war es möglich, Wertsteigerungen bzw. -minderungen im Nutzungspotential zu ermitteln und differenziert nach den Teilkomplexen Boden, Relief und Geländeklima darzustellen. Insgesamt wurde durch die Studie jedoch deutlich, daß auch bei einem rein nutzungsorientierten Ansatz die Erfassung und die Bewertung des natürlichen Potentials nicht von einer wissenschaftlichen Disziplin allein bewältigt werden kann, sondern eine interdisziplinäre Aufgabe darstellt. ZANGEMEISTER (1973) und BECHMANN (1978) entwickelten das mathematische Bewertungsmodell der *Nutzwertanalyse 1. und 2. Ordnung*. Dieses Modell sollte eine Quantifizierung der Erholungsbewertung ermöglichen, um sie damit objektiver zu gestalten. Nach FINKE (1994) "wächst die Kritik an der in der Ökonomie entwickelten Nutzwertanalyse, die streng methodisch auf ökosystemare Zusammenhänge gar nicht angewendet werden dürfte". Daher rückte man auch von der reinen Anwendung der Nutzwertanalyse in der Folgezeit wieder ab (vgl. LESER & SCHMIDT 1981).

GIS-gestützte Verfahren. Mit der rasanten Entwicklung und Verwendung von Computern und Softwaresystemen, insbesondere von Geoinformationssystemen und deren Kopplung mit modernen Methoden der Landschaftsbewertung wächst die Hoffnung, immer komplexere landschaftsökologische Sachverhalte zu bearbeiten. Dadurch scheint es in Zukunft möglich zu sein, den Handlungsbedarf zur Verbesserung der ökologischen Situation - unter Einbeziehung der ökonomischen Interessen und Bedürfnisse - in Landschaftseinheiten besser herauszuarbeiten.

Schon relativ früh suchte man eine Möglichkeit, die Analyse des Einflusses und der Funktion des Partialkomplexes *Relief* durch Digitale Geländemodelle rechnergestützt zu erleichtern, da großräumige Betrachtungen des Reliefs meist mit zeitaufwendigen Kartierungen und Feldstudien verbunden sind. STROBL (1988) stellt aus "geographisch-landschaftsökologischer Sicht " (LESER 1991a) die Einsatzmöglichkeiten von DGM unter geomorphologischem, klimatologischem, hydrologischem und landschaftsökologischem Aspekt heraus. Trotz der heute reichlich vorhandenen Software stellt noch immer die Erstellung, Verfügbarkeit und die Genauigkeit von Digitalen Geländemodellen ein sehr großes Problem dar, was auch die Einbindung in landschaftsökologische und landschaftsplanerische Untersuchungen und Bewertungen einschränkt (vgl. VOLK & STEINHARDT 1996). KÖTHE & LEHMEIER (1993) entwickelten ein System zur Automatischen Reliefanalyse (SARA) für DGM, welches eingeschränkt auch Eingang in die Praxis gefunden hat. Im optimale Falle erlauben Digitale Geländemodelle (integriert in GIS) - neben der Visualisierung von Landschaftsstrukturen (vgl. SUTER et al. 1996) - die Analyse und Simulation der Reliefeigenschaften als wichtige Steuergröße im Landschaftshaushalt. Leider sind dabei auch Trends zu beobachten, die ausschließlich Visualisierungen verfolgen. Neben rechnergestützten Verfahren zur Analyse und Bewertung einzelner Partialkomplexe bieten sich Geoinformationssysteme jedoch für komplexe, integrative Bewertungsansätze an.

Der *integrative Ansatz* orientiert sich an Regelkreis- und Modellvorstellungen des Geo(öko)systems (vgl. MOSIMANN 1985; KLUG & LANG 1983). Ziel ist es dabei, in regionalen Ansätzen die Bereitstellung von Leistungen für Umweltschutz und Erholung sowie die gleichzeitige Versorgung mit Nahrungsmitteln und Umweltgütern besser zu verknüpfen (SRU 1996). BARSCH & SAUPE (1994) sehen in der modularen Integration landschaftsökologischer und sozioökonomischer Daten in die gebietliche Planung ein Mittel zur Verhinderung und Lösung von Nutzungskonflikten zwischen ökologischen und ökonomischen Interessen. An Beispielen wendeten sie für diesen komplexen, integrativen Ansatz (Funktionen und Potentiale) Bewertungsmethodiken in einem Geographischen Informationssystem (Arc/Info) in Verbindung mit digitaler Bildverarbeitung unter dem System Erdas Imagine Satellitenbildinterpretation) an. In Verbindung damit wurde zudem für die Integration von Meß- und Schätzwerten sowie die Anpassung verschiedener Verfahren an die zugrunde gelegte Bewertungsskala unter Berücksichtigung vorhandener Heterogenität der Flächen ein *Fuzzy-Set-Daten-Modell*

(Theorie der unscharfen Mengen) definiert, das auch bei unsicheren oder unvollständigen Datensätzen eine Bewertungsabschätzung erlaubt.

GRABAUM (1996a) entwickelte eine rechnergestützte Methode, bei der unter optimaler Berücksichtigung verschiedenartigster Ziele und Abwägung der ökologischen und ökonomischen Interessen Landschaftselemente einer Landschaftseinheit umgestaltet werden können. So kann z.B. die Landnutzung von ausgeräumten, überwiegend auf landwirtschaftliche Produktion ausgelegte Intensivagrarlandschaften (überwiegend Ackerflächen) durch ein derartiges Verfahren nach optimalem Kompromiß zwischen den vier Zielen Erosionsminderung, Beibehaltung der Abflußregulation, Verbesserung der Grundwasserneubildung und Beibehaltung der Produktion auch aus ökologischer Sicht optimiert werden (vgl. auch MEYER & GRABAUM 1997). Dieses Verfahren wurde auf topischem Niveau erprobt und erfordert zahlreiche, relevante Informationsebenen unterschiedlicher Art, die allerdings noch in den seltensten Fällen von größeren Arbeitsgebieten verfügbar, bzw. nur durch sehr großen Arbeitsaufwand zu erstellen sind.

1.1.5 Systematisierung der verschiedenen Landschaftsbewertungsverfahren

MARKS et al. (1992) zeigen auf, daß sich alle bisher entwickelten (ökologischen) Bewertungsverfahren sich auf vier "Verfahrensgrundmuster" zurückführen lassen. Verfahrensablauf und -grundmuster der verschiedenen Landschaftsbewertungsverfahren sind in HASE (1996) systematisierend zusammengestellt (s. Abbildung 1.1-1).

Offene Probleme beim Bewertungsablauf und Perspektiven. Bei der Betrachtung der Entwicklung und des heutigen Standes der landschaftsökologischen Forschung sind noch zahlreiche offene Probleme beim Ablauf von Landschaftsbewertungen erkennbar. Ein Hauptproblem besteht darin, daß es trotz der Entwicklung einer Fülle von Verfahren bisher noch kein Raum- und Landschaftsbewertungssystem gibt, das Allgemeingültigkeit besitzt (vgl. LESER 1991a). Die Erfassung, Bewertung und Abbildung ökologischer Phänomene kann auch immer nur unvollständig sein, da sie zu komplex sind und bisher längst nicht alle ökologischen Wirkungsgefüge ausreichend bekannt sind. Daher ist auch die "Aggregation mehrerer ökologischer Parameter in einzelnen Verfahren immer mit Unsicherheiten behaftet, da Wechselwirkungen nicht bekannt sind" (vgl. MARKS et al. 1992) . Mit Recht weisen daher RICHTER et al. (1997) darauf hin, daß man bei der Untersuchung georeferenzierter Prozesse auf unterschiedlichen Maßstäben zu der Erkenntnis gekommen ist, daß nicht alle

landschaftsökologisch relevanten Prozesse exakt quantifizierbar sind. Selbst bei der Modellierung von physikalisch bekannten Prozessen (z. B. dem Wasser- und Stofftransport im Boden), ergibt sich in der landschaftsbezogenen Größenordnung das Problem der Unsicherheit der Modellparameter.

In bezug auf die Betrachtung und die Übertragbarkeit von Bewertungsverfahren auf unterschiedliche Maßstabsebenen, die eine zentrale Rolle sowohl in der Landschaftsökologie als auch in der raumplanerischen Praxis spielen, ist festzustellen, daß auch hier noch keine allgemeingültige Theorie existiert, "die eine Ableitung von Regeln für [z.B.] die *Regionalisierung* erlaubt" (vgl. RICHTER et al. 1997). Derzeit sind dabei zwei grundsätzlich verschiedene Ansichten zu verzeichnen: Einerseits wird versucht, Methoden zu finden, die eine Übertragung kleinräumig gültiger Aussagen/Methoden auf größere Areale mittels geeigneter Indikatoren oder Transferfunktionen erlauben ("upscaling"). Daher müssen noch immer für jeden Anwendungsbereich neue Transferfunktionen entwickelt werden. Aus Sicht der Bodenkunde scheint dieses Problem erfolgreich durch sogenannte "Pedo-Transfer-Funktionen" gelöst worden zu sein (vgl. TIETJE & TAPKENHINRICHS 1993). Andererseits wird die Meinung vertreten, daß spezifische Arbeitsweisen auf jedem Betrachtungsniveau erforderlich sind. Hier sollten zukünftige Forschungen ansetzen, um die Frage nach Verknüpfungspunkten zwischen diesen beiden Ansichten zu beantworten. Ungeachtet dieses Problems wäre es aber auf jeden Fall von Vorteil für die Methoden der Regionalisierung, wenn die Verwendung von unsicheren Daten verschiedener Skalenebenen gewährleistet wäre, da die räumliche und/oder zeitliche Auflösung der für die Untersuchungsgebiete verfügbaren Daten für die Bearbeitung der Fragestellungen einzelner Projektbereiche meist nicht ausreichend ist (vgl. auch MOEVIUS & MURSCHEL 1997). Hier ist der Einsatz *von Fuzzy-Set-Daten-Modelle* denkbar, deren mögliche Anwendung auch in diesem Band diskutiert wird.

Ein weiteres Problem besteht in der *Anwendbarkeit* von Verfahren, die in Forschungseinrichtungen ohne expliziten Praxisbezug erarbeitet wurden. So betont FINKE (1994), daß es sich bei der landschaftsökologischen Raumgliederungen von HAASE (1968) um eine der wenigen aus der Geographie handelt, die die Zielsetzung einer praktischen Verwendbarkeit in der Agrarplanung verfolgen. Im Gegensatz zur rein wissenschaftlich orientierten landschaftsökologischen Grundlagenforschung, die heute eine "holistische" Herangehensweise (Berücksichtigung so vieler ökologischer und ökonomischer Parameter bzw. deren Interaktionen innerhalb und zwischen Landschaftsökosystemen wie möglich) anstrebt, erfolgt im Rah-

men praxisorientierter Arbeiten bereits eine bewußte Auswahl der zu erhebenden Daten. Dabei wird sich auch aus Kosten- und Zeitgründen auf das Wesentliche beschränkt, wobei ökologische Gesichtspunkte dann oft vernachlässigt werden. KLEYER et al. (1992) bemerken dazu, daß die Landschaftsplanung deshalb so häufig in der Abwägung mit anderen Nutzungsinteressen unterliegt, weil der Nachweis der Beeinträchtigung von Umweltbelangen nicht flächenhaft, exakt und mit den wesentlichen Wechselwirkungen durchgeführt werden kann. Dazu führt allerdings KIEMSTEDT (1979) an, daß eine ökologische Orientierung der Raumplanung im Sinne einer umfassenden Steuerung ökologischer Gesamtsysteme den Handlungsrahmen unserer gesellschaftlich-politischen Verhältnisse überschreiten würde. So sind z. B. integrierte Ansätze in der Umweltleitplanung weder als klassische Raumplanung noch als Fachplanung definiert: Sie geht nach PETERS (1996, in DURWEN 1997) vielmehr vom Wirkungsgefüge aus, bewertet und definiert Umweltstandards. Innerhalb der planerischen Abwägung wird ein Optimierungsgebot formuliert, wobei örtliche und regionale Umweltleitpläne zu erarbeiten sind. Zudem stellt sich nach FINKE (1994) in der Praxis immer deutlicher heraus, daß Bewertungsverfahren "möglichst einfach und nachvollziehbar sein müssen, damit auch der interessierte Bürger die Ergebnisse rekonstruieren und damit begründete Entscheidungen nachvollziehen kann." Aus den o.g. gegensätzlichen Anforderungen wird deutlich, daß ein Kompromiß zwischen der "wissenschaftlich exakten, holistischen" Herangehensweise der Forschung und der "übersichtlichen, wirtschaftlichen und nachvollziehbaren" Methodik für den Anwender in der Praxis gefunden werden muß. Dieses Problem kann nur gemeinsam im Dialog zwischen Forschung und Planungspraxis gelöst werden.

Andererseits werden in den letzten Jahren auch in Ämtern und Behörden immer öfter Umweltinformationssysteme aufgebaut, die den Einsatz von Geographischen Informationssystemen zur Folge haben und auch Ansätze zu komplexeren landschaftsökologische Bewertungen zeigen (vgl. SENSTADTUM 1990, ANDERS 1997). Hier ist allerdings anzumerken, daß es gerade in der praktischen Anwendung aufgrund des Mangels an ausreichend qualifizierten Fachkräfte, die die z. T. hochkomplizierten Systeme bedienen können, noch Defizite gibt. Außerdem mangelt es häufig an Grundlagendaten, oder der vorliegende Datenbestand ist heterogen, weil er im Laufe der Zeit aus den jeweiligen Ansprüchen heraus entstanden ist, die untereinander unabhängig sind oder waren. Leider werden viele von diesen Datenbeständen nicht fortgeführt, bleiben also als einmalige Momentaufnahmen stehen. Hier bleibt zu hoffen,

daß im Laufe der nächsten Zeit die Datengrundlage verbessern wird und sich allgemeingültige, integrative Bewertungsverfahren durchsetzen werden. Dies setzt aber auch die tendenziell erkennbare Entwicklung von "bedienerfreundlicheren" Systemen voraus, wie dies z. B. mit den "kleineren Geschwistern ArcView vom hochkomplexen System ArcInfo" zu sehen ist (vgl. KRATZ & SUHLING 1997). Als Grundvoraussetzung ist zudem eine Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Ämtern, Behörden und Forschungseinrichtungen und damit in direktem Zusammenhang eine rechtliche Vereinfachung des erforderlichen Datenaustausches (vgl. DFG 1996) anzustreben. Festzuhalten bleibt auch, daß der Umfang der Realisierung von Bewertungsverfahren und Entwicklungsszenarien in der Praxis auch oft weniger wegen ihrer Ergebnisqualität als von ökonomischen Voraussetzungen und politischen Strukturen bestimmt wird (vgl. ROWECK 1995).

1.1.6 Ausblick

Im vorliegenden Artikel wurde versucht, aus der fast unüberschaubaren Fülle der Methoden die Entwicklung und den Stand der Landschaftsbewertung herauszukristallisieren. Neben den zahlreichen Problemen, welche die Anwendung der derzeit wohl zu recht favorisierten integrativen Bewertungsverfahren mit sich bringen, sind aber die Vorteile dieser Methode(n) im Sinne einer "holistischen" Herangehensweise nicht von der Hand zu weisen - wobei die Entwicklung allgemeingültiger Verfahren und Definitionen oberstes Ziel zukünftiger Forschungen sein sollte. Noch immer gilt hier die Feststellung von NEEF (1967b), wonach die Methodik einer wirklich wissenschaftlichen Synthese erst noch entwickelt werden muß. Integrative Verfahren versuchen, so viele ökologische und ökonomische Parameter bzw. deren Interaktionen innerhalb und zwischen Landschaftsökosystemen einzubeziehen - sich also so nah wie möglich der komplexen Wirklichkeit zu nähern. Da eine diesbezügliche Quantifizierung nicht bis ins Letzte möglich ist und auch von "der experimentellen Seite zur Modellierung oftmals nur unvollständige und/oder unpräzise Daten zur Verfügung stehen" (RICHTER et al. 1997) und nachhaltige Landschaftsentwicklung kompromißorientierte Entscheidungen erfordert, müssen neue Wege gefunden und beschritten werden. Die Entwicklung und Einbindung von mathematischen Verfahren in die Landschaftsbewertung wird hinsichtlich der Verwendung von unsicheren Datensätzen, der Kopplung ökologischer Modelle mit Geographischen Informationssystemen (vgl. z.B. JOHNSTON 1993) und zur Entscheidungsfindung in Zukunft unerläßlich sein, gerade im Hinblick auf die Übertragbarkeit von Bewertungsverfahren und Modellen auf kleinere Maßstabsebenen (Regionalisierung).

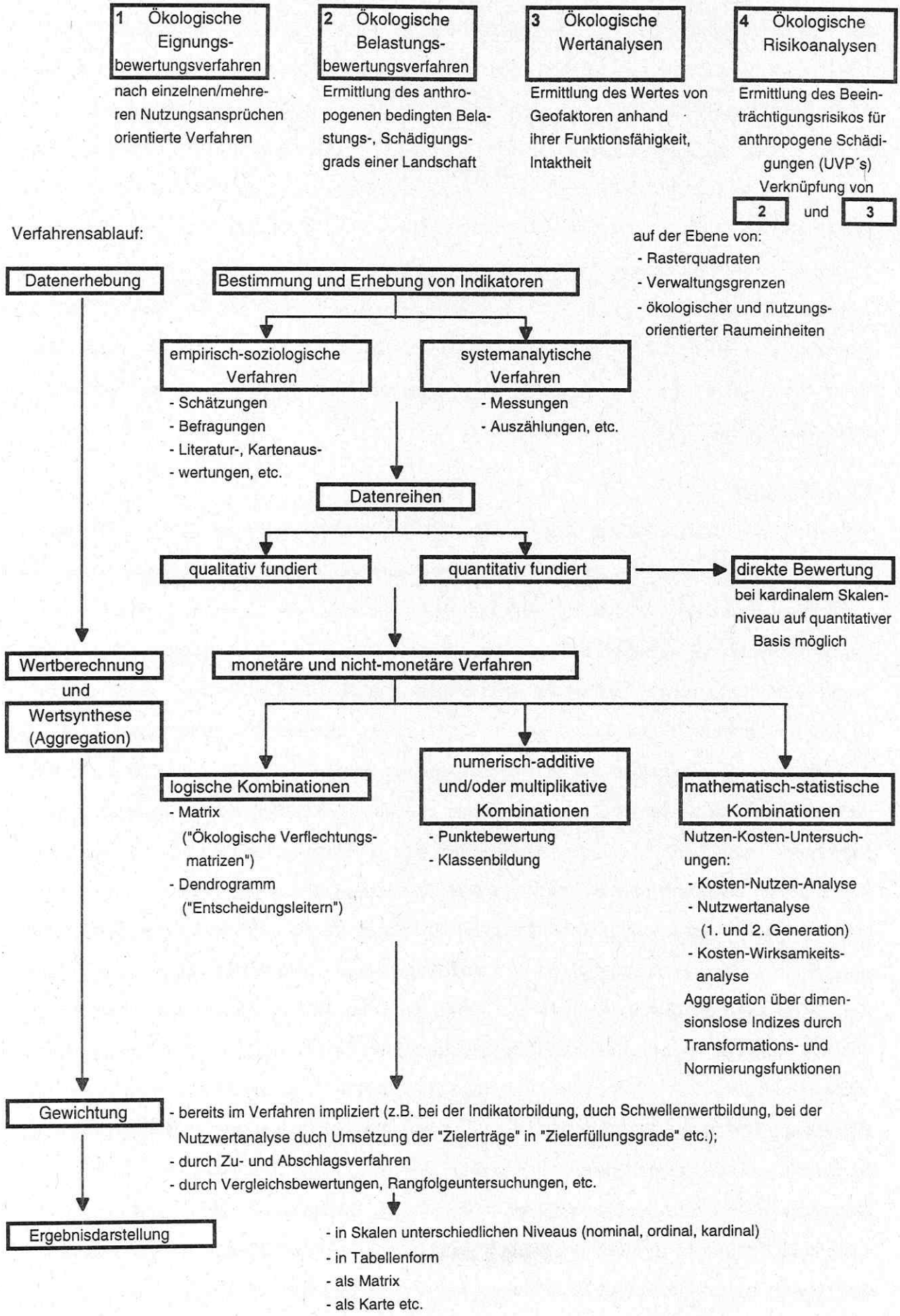


Abb. 1.1-1 Grundmuster ökologischer Bewertungsverfahren

1.2 Polyfunktionale und Multifunktionale Landschaftsbewertung - ein Vergleich

Ralf Grabaum

1.2.1 Einleitung

Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte am UFZ wurden Landschaftsbewertungen unterschiedlichster Untersuchungsgebiete auf topischem Maßstabsniveau vorgenommen. Dabei kamen zwei unterschiedliche Verfahren zur Anwendung, die beide das Prinzip der Multifunktionalität der Landschaft in der Funktionsauswahl berücksichtigen (im Gegensatz zu monofunktionalen Verfahren, welche eine einzelne Funktion meist unabhängig von anderen bewerten). Um diese Funktionen zu beschreiben, wird bei beiden Verfahren auf das Konzept der Naturfunktionen von DE GROOT (1992) zurückgegriffen, der diese Naturfunktionen in vier verschiedene Funktionsgruppen (Regulations-, Produktions-, Informations- und Trägerfunktionen) unterteilt. Dabei ist auf Ausgewogenheit bei der Auswahl der Funktionen unter jeweiliger Beachtung landschaftsspezifischer Besonderheiten sowie entsprechend der formulierten Nutzungsansprüche zu achten. Häufig ist festzustellen, daß Regulationsfunktionen in der Landnutzung am stärksten beeinträchtigt sind und diese deshalb auch einen wesentlichen Platz bei der Bewertung einnehmen müssen. Andererseits darf das nicht zu einer Vernachlässigung anderer notwendiger Funktionen führen (z.B. der Produktionsfunktion in Intensivagrarlandschaften).

Von GRABAUM (1996a) wurde ein polyfunktionales Bewertungsverfahren entwickelt, welches auf einem Verfahren von NIEMANN (1982) aufbaut und Funktionen der Natur (De Groot 1992) bewertet. Polyfunktionale Bewertung bedeutet, daß mehrere Funktionen mit einer einheitlichen Bewertungsvorschrift integral bearbeitet werden. So könnte die Nutzwertanalyse als eine Art polyfunktionale Bewertung bezeichnet werden. Grundgedanken der Nutzwertanalyse sind in dem Verfahren von NIEMANN (1982) eingegangen. Bei diesem landschaftsbezogenen Bewertungsansatz ist die Multifunktionalität von vornherein vorausgesetzt. Der Begriff polyfunktional ist historisch entstanden durch NIEMANN (1982, s. auch HAASE 1991) und wurde von GRAUBAUM aufgrund der Äquivalenz des Bewertungsalgorithmus übernommen. Das von GRABAUM entwickelte polyfunktionale Bewertungsverfahren wurde beispielhaft am Untersuchungsraum „Wasserfallalm" im Alpen- und Nationalpark Berchtesgaden (basierend auf Datengrundlagen des MAB-6-Projektes)

angewandt (GRABAUM 1996a,b). Dabei standen Untersuchungen zur Almwirtschaft und zum Tourismus (speziell Sommertourismus) im Vordergrund.

Eine Teilaufgabe der Dissertation von MEYER (1997) bestand in der Bewertung unterschiedlicher Funktionen des Leistungsvermögens des Landschaftshaushaltes in Agrarlandschaften. Diese Untersuchungen wurden im Untersuchungsgebiet „Jesewitz" in Nordwestsachsen durchgeführt und waren Teil des Verbundprojektes „REGNAL" (s. FELDMANN et al. 1997). Besondere Beachtung wurde auf die Untersuchung der natürlichen Regulation in Agrarlandschaften gelegt. Dabei wurde auf monofunktionale, jedoch mehr oder weniger streng validierte Verfahren zurückgegriffen. Unter Anwendung der Methodik der Leitbildentwicklung wurden diese mit Hilfe eines Zielsystems unter Beachtung regionaler Aspekte und erwarteter Nutzungsanforderungen ausgewählt. Die Ergebnisse wurden durch eine einheitliche ordinal skalierte Darstellung vergleichbar und konnten für weitere Untersuchungen zusammenhängend verwendet werden. Aufgrund der Kopplung verschiedener Funktionen in einem Zielsystem handelt es sich um ein multifunktionales Verfahren, welches im weiteren als das Verfahren der multifunktionalen Landschaftsbewertung bezeichnet wird (s.a. MEYER & GRABAUM 1997).

Bei beiden Anwendungen bestand die Aufgabe, die Bewertungen als Grundlage für eine zielorientierte Landnutzungsänderung zu verwenden. Dabei wurde auf die Methodik einer multikriteriellen Landnutzungsoptimierung zurückgegriffen, wie sie von GRABAUM (1996a) entwickelt wurde. Über die Anwendung dieses Verfahrens sind weitere Ausführungen bei GRABAUM (1996b), MEYER & GRABAUM (1997) und GRABAUM & MEYER (1997a,b) zu finden. MEYER (1997) beschreibt weitere Verwendungsmöglichkeiten von Bewertungsergebnissen, wie sie in der Planungspraxis verwendet werden können.

Im folgenden sollen beide Verfahren verglichen werden, um Aussagen über ihre Anwendungsrelevanz zu erhalten. Dabei wird auf die oben beschriebenen Beispiele zurückgegriffen. In Tabelle 1 werden die wichtigsten Vergleichskriterien beider Verfahren gegenübergestellt. Betrachtet werden neben der Zielstellung und den Grundgedanken des Algorithmus auch Fehlerabschätzungen, Validität, Subjektivität, technische Realisierung und Einbindung in ein Geographisches Informationssystem (GIS). Gerade diese Merkmale sind für eine Entscheidung zur Anwendung der Verfahren wichtig. Des weiteren werden die Anwendungsgebiete diskutiert.

Ziel beider Verfahren ist es, eine bewertende Aussage über verschiedene Landnutzungsarten hinsichtlich der Erfüllbarkeit ausgewählter Naturfunktionen im Untersuchungsraum zu treffen. Diese bewertende Aussage erfolgt in Form sogenannter Funktionsleistungsgrade und eröffnet die Möglichkeit, gezielt Landnutzungsänderungen anzustreben, welche dem regionalen Leitbild und damit den regionalen Nutzungsanforderungen entsprechen.

1.2.2 Ausgangspunkt und Datenerfordernisse

Am Beginn beider Verfahren steht die Auswahl der zu bewertenden Funktionen. Wesentliche Grundlage der Funktionsauswahl sind Zielvorstellungen der Gesellschaft an den Untersuchungsraum, die in Form von Leitbildern definiert werden. Die Auswahl der Funktionen sollte auch berücksichtigen, ob die zur Bewertung notwendige Datengrundlage verfügbar ist. Für das multifunktionale Bewertungsverfahren bedeutet das Fehlen einer Datenebene, daß die Funktion nicht bewertet werden kann. Beim polyfunktionalen Bewertungsverfahren entscheidet der Anwender, ob die sich mit fehlender Datenebene verschlechternde Bewertungsaussage für die Zielstellung noch hinreichend ist. (Dies ist abhängig von der Gewichtung der Datenebenen (im weiteren als Merkmal bezeichnet) im Bewertungsprozeß.) Des weiteren ist für beide Verfahren eine Analyse der Landnutzungen des Untersuchungsraumes notwendig.

1.2.3 Verfahrensstruktur

Bei dem polyfunktionalen Verfahren erfolgt die eigentliche Bewertung nach einem einheitlichen Algorithmus. Dabei werden zunächst für alle zu bewertenden Funktionen die bewertungsrelevanten Merkmale definiert. Dies geschieht in Form eines sogenannten Merkmalsbaumes. Die einzelnen Merkmale erhalten ein Bedeutungsgewicht. Die mögliche Breite der Merkmalsausprägungen wird ermittelt und die Ausprägungen werden in (ordinale) Klassen eingeteilt. Die real ermittelten Daten (Merkmalsgrößen) werden den Klassen zugeordnet (tatsächliche Merkmalsausprägungen). Für jedes Paar Merkmal-Funktion, bei welchem ein Merkmal ein Bedeutungsgewicht größer als Null bezüglich dieser Funktion zugewiesen wurde, wird eine Wirkungsfunktion definiert, welche angibt, wie sich bei entsprechender Ausprägung des Merkmals die Funktion erfüllen läßt. Der in der Wirkungsfunktion ablesbare Funktionswert der tatsächlichen Merkmalsausprägung wird mit dem dazugehörigen Bedeutungsgewicht des Merkmals multipliziert. Anschließend erfolgt eine Summation dieser Produkte über alle Merkmale einer Funktion, die ein positives Bedeutungsgewicht haben. Letztendlich erfolgt die Einteilung der Bewertungsergebnisse in

Zehner- oder Fünferklassen. Der Ablauf des Gesamtverfahrens ist in Abbildung 1.2-1 dargestellt.

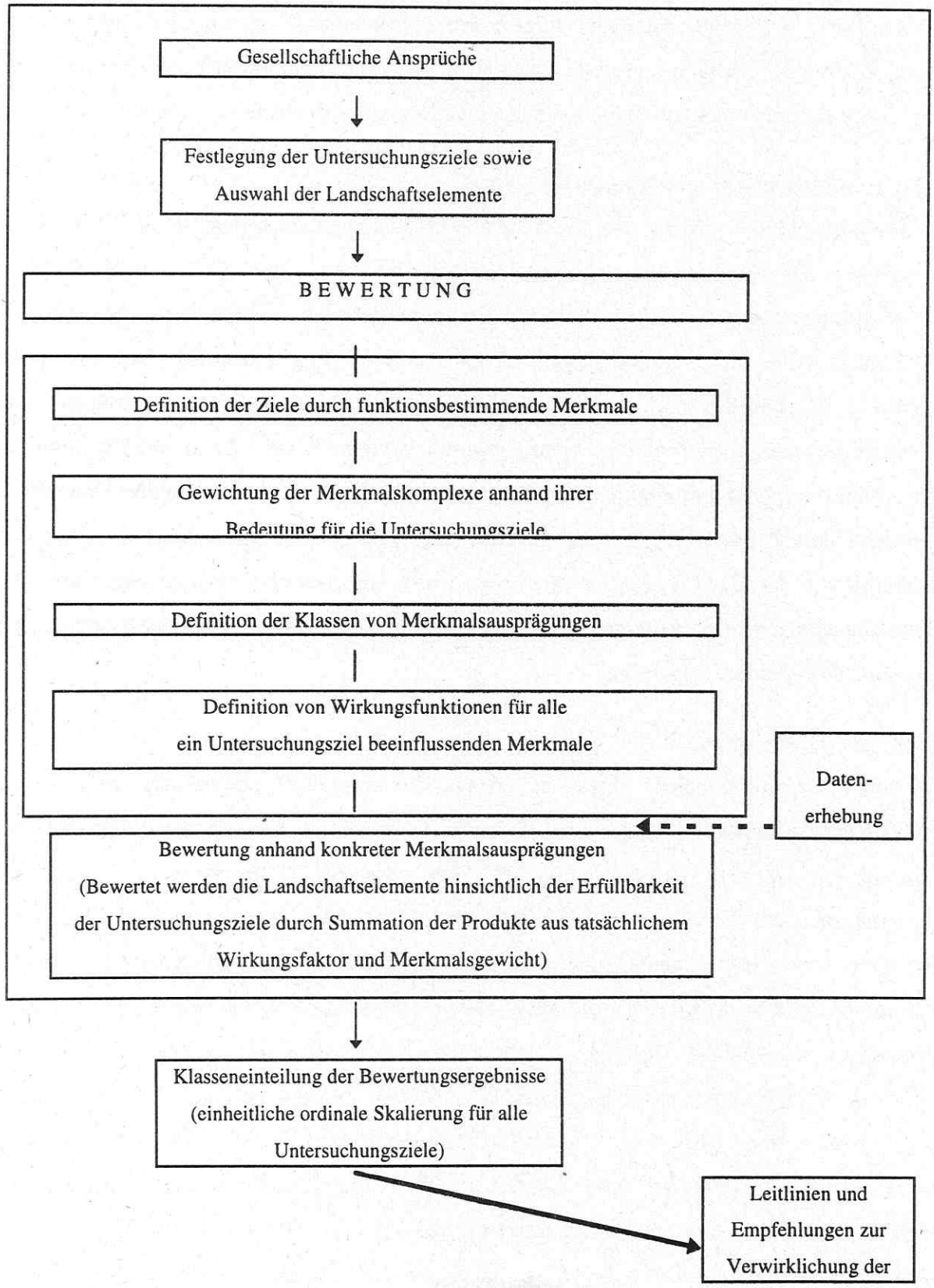


Abb. 1.2-1: Verfahren der polyfunktionalen Bewertung (nach GRABAUM 1996a, verändert)

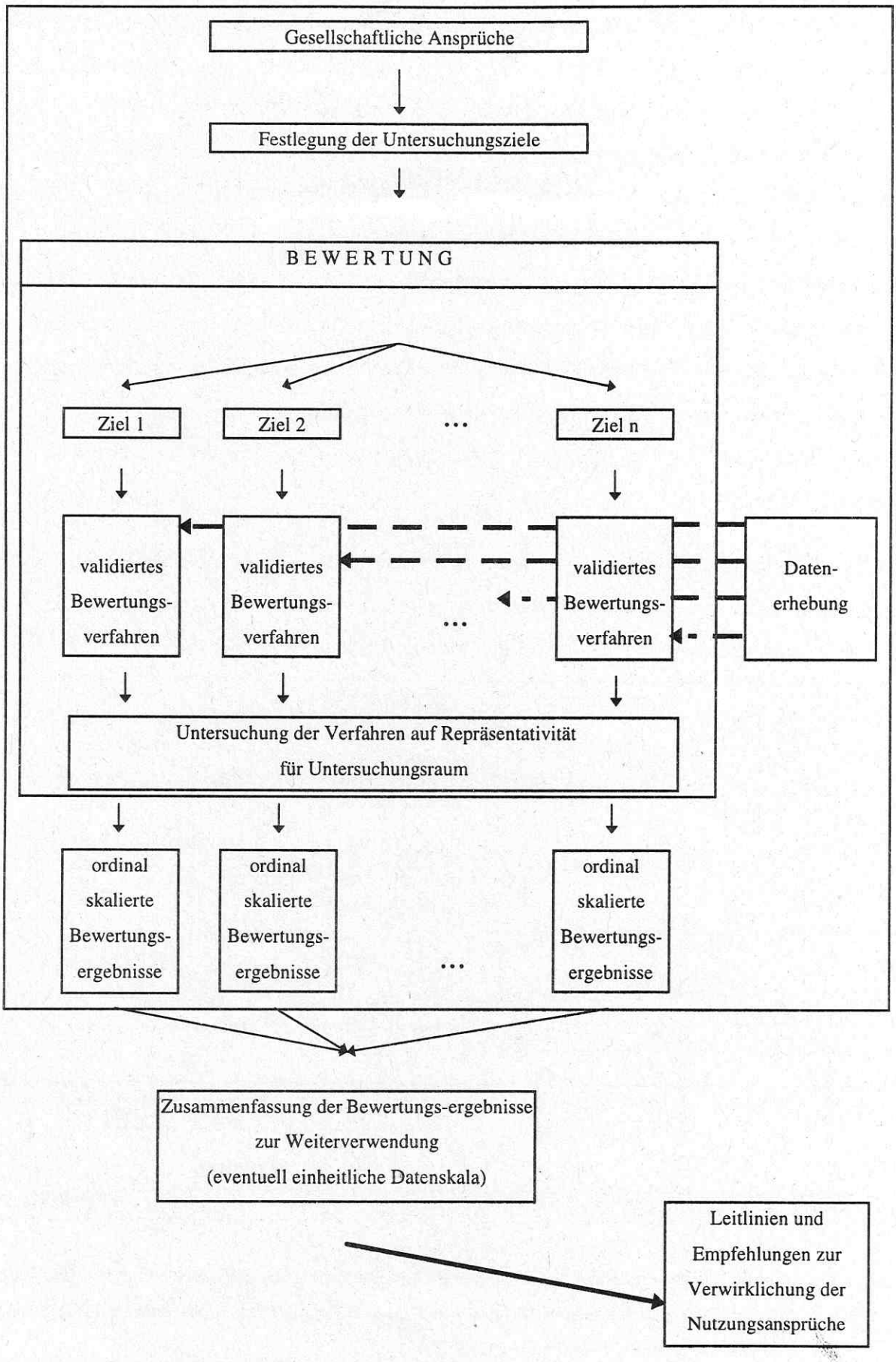


Abb. 1.2-2: Verfahren der multifunktionalen Bewertung

Das multifunktionale Verfahren nutzt die vorhandene Auswahl validierter, monofunktionaler Bewertungsverfahren. Hier kann z.B. auf die „Anleitung zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushalt (BA LVL)" von MARKS et al. (1992) mit einer umfangreichen Sammlung von validierten Bewertungsverfahren zurückgegriffen werden. Des weiteren bietet die Literatur auch einzelne Bewertungsverfahren an, wie etwa das Verfahren zur Bewertung der Bodenerosion durch Wasser (SCHWERTMANN et al. 1990), zur Bewertung der Grundwasserneubildung (RENGER & STREBEL 1980) u.a. Jedes Bewertungsverfahren verwendet seine eigene Bewertungsformel und läßt sich nur dann anwenden, wenn die geforderten Datengrundlagen zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse liefern häufig quantitative Aussagen, welche anschließend qualitativ bewertet und ordinal skaliert dargestellt werden können. Der Ablauf des Verfahrens der multifunktionalen Bewertung ist in Abbildung1.2-2 dargestellt.

Als Beispiel eines validierten Bewertungsverfahrens zeigt Abbildung 1.2-3 die Bewertung des langjährigen mittleren Bodenabtrags durch Wassererosion nach SCHWERTMANN et al. (1990) und deren Einbindung in ein Geographisches Informationssystem (GIS, s.u.).

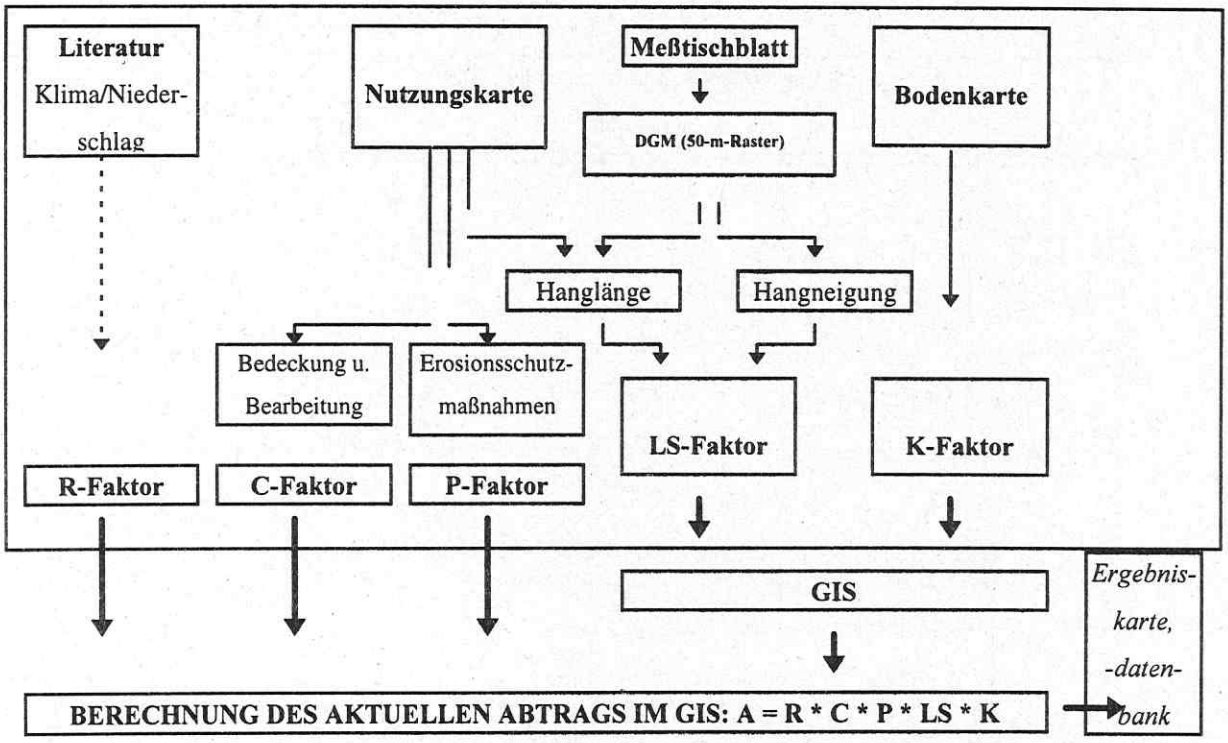


Abb. 1.2-3: Beispiel eines validierten Bewertungsverfahrens: Bewertung der Bodenerosionsgefährdung durch Wasser nach Schwertmann et al. (1990) und Verknüpfung der Primärdatenebenen im GIS (nach MEYER & GRABAUM 1996, leicht verändert)

1.2.4 Merkmale und Gewichtung

Die eine Funktion definierenden Merkmale werden beim polyfunktionalen Bewertungsverfahren in der Funktionsdefinition in Form eines Merkmalsbaumes zusammengestellt (s. GRABAUM 1996a). Dabei werden die für alle Ziele definierenden Merkmale in Form einer gemeinsamen Merkmalsliste zusammen betrachtet. Durch Literaturangaben oder Expertenaussagen ist zu entscheiden, ob nicht definierende Merkmale (Hauptmerkmale) eventuell eine nachrangige Bedeutung für die Erfüllbarkeit eines Untersuchungszieles aufweisen (Nebenmerkmale). Dies kann bei der Merkmalsgewichtung durch Gewichte zwischen 0 und 1 realisiert werden. Definierende Merkmale erhalten Gewichte zwischen 1 und 5. Über die Gewichtung entscheidet ebenfalls die Expertengruppe. So ist z.B. dem Merkmal „Exposition des Hanges" als definierendes Merkmal für die Funktion „Almwirtschaft Rinderbeweidung" (Zuwachs an Futter abhängig von Sonneneinstrahlung) eine nachrangige Bedeutung für die Erosionsdisposition zugeordnet (unterschiedliche Expositionen sind unterschiedlich regenreich, s. Beispiel Berchtesgaden bei GRABAUM 1996a). Dieses Merkmal kommt aber bei der Definition der Erosionsdispositionsfunktion im Merkmalsbaum nicht vor. Abbildung 1.2-4 zeigt einen Definitionsbaum für die Produktionsfunktion Almwirtschaft-Rinderbeweidung nach GRABAUM (1996a).

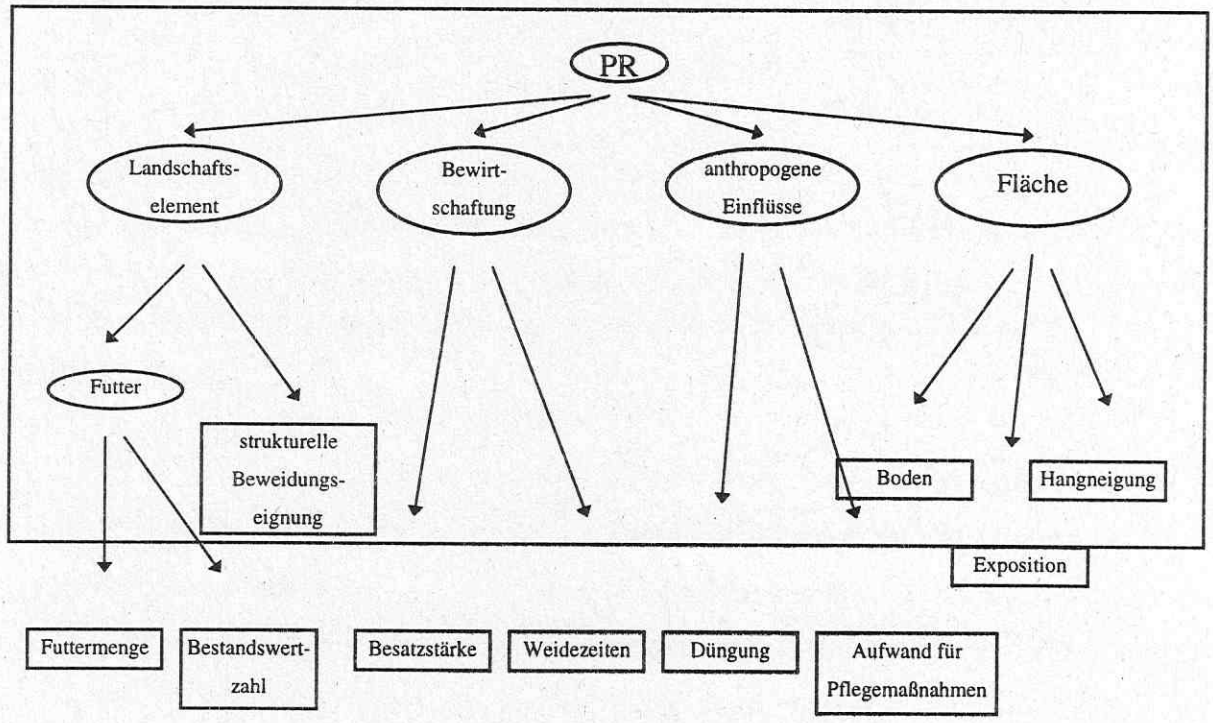


Abb. 1.2-4: Merkmalsbaum zur Definition der Produktionsfunktion Almwirtschaft-Rinderbeweidung PR (nach GRABAUM 1996a). In den Ovalen sind Zwischenhierachieebenen dargestellt. Die Kästen beinhalten die in Daten erfaßten Merkmale.

1.2.5 Merkmalsausprägungen und Wirkungsfunktionen

Bei der multifunktionalen Bewertung wird für jedes Einzelbewertungsverfahren eine eigene Merkmalsliste benötigt, die jedoch vorgegeben ist. Es erfolgt keine zusätzliche subjektive Gewichtung. Diese ist vielmehr in unterschiedlicher Form (Korrekturfaktoren, Koeffizienten u.a.) in die Bewertungsformel integriert und durch die Validierung der Verfahren bestätigt.

Bei der polyfunktionalen Bewertung erfolgt die Definition der Wirkungsfunktionen ebenfalls subjektiv durch ein Expertenteam. Dabei werden scheinbar bekannte Wirkungszusammenhänge linearisiert (Abbildung 1.2-5). Diese meist nichtliniearen Wirkungszusammenhänge sind dagegen in den Bewertungsformeln validierter Bewertungsverfahren integriert. Häufig beruhen sie auf Meßreihen o.ä. Damit geht bei der multifunktionalen Bewertung weniger Information verloren, da auf die Linearisierung verzichtet werden kann.

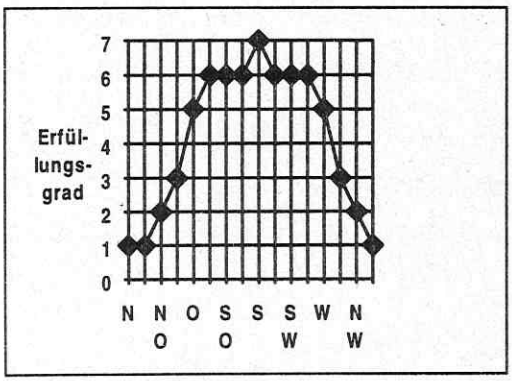


Abb. 1.2-5: Wirkungsfunktion, welche die Erfüllbarkeit der Produktionsfunktion „Almwirtschaft-Rinderbeweidung", definiert in 8 Stufen, bei 16 verschiedenen Merkmalsausprägungen des Merkmal „Exposition des Hanges" (Himmelsrichtungen) darstellt (s. Beispiel Berchtesgaden in GRABAUM 1996a)

Eine unterschiedliche Herangehensweise ergibt sich auch beim Input der Daten. Während die real ermittelten Daten bei der multifunktionalen Bewertung direkt in die einzelnen Verfahren übernommen werden, erfolgt bei der polyfunktionalen Bewertung vorher eine Einteilung in (ordinale) Klassen. Diese Einteilung wird häufig wieder subjektiv vorgenommen, so daß auch an dieser Stelle Information verloren geht. Andererseits macht eine derartige subjektive Klasseneinteilung weniger konkrete Daten, die in validierten Verfahren nicht verwendet werden können, erst handhabbar.

1.2.6 Bewertungsformel und -ergebnisse

Die im polyfunktionalen Verfahren verwendete Bewertungsformel stellt eine simple Verknüpfung dar (Summation über Produkte) und ist für alle Untersuchungsziele gleich. Damit wird die Realität größtenteils ungenau widergespiegelt. Die bei der multifunktionalen Bewertung verwendeten Verfahren sind voneinander verschieden (was die Bearbeitung erschwert), spiegeln jedoch durch validierte Modellbildung die Realität (in Grenzen) meist genauer wider. Entsprechend unterschiedlich sind auch die Ergebnisse. Bei der polyfunktionalen Bewertung erhält man Klassen von Funktionsleistungsgraden (5 oder 10 Stufen) mit qualitativen Einschätzungen. Eine Quantifizierung ist nicht möglich. Die bei der multifunktionalen Bewertung angewandten Verfahren liefern größtenteils quantitative Ergebnisse (häufig in Form von Mittelwerten), mit denen jederzeit eine Umwandlung in qualitative Klassen von Funktionsleistungsgraden möglich ist. So wurden im Untersuchungsgebiet Jesewitz bei der Bewertung des mittleren langjährigen Bodenabtrags unter Annahme von Schwarzbrache Ergebnisse zwischen 0,47 t/ha * Jahr und 30,55 t/ha * Jahr ermittelt. Diese Werte wurden anschließend in 5 ordinale Klassen (geringer Bodenabtrag bis extrem überhöhter Bodenabtrag) eingeteilt (s. MEYER & GRABAUM 1996).

Multifunktionalität. Multifunktionalität der Bewertung heißt Verknüpfung der Untersuchungsziele zu einer einheitlichen Aussage. Diese Verknüpfung ist bei der polyfunktionalen Bewertung von Beginn an integriert und wird durch gemeinsame Merkmalslisten, eine einheitliche Bewertungsvorschrift sowie einheitlich ordinal skalierte Ergebnislisten erreicht. Bei der multifunktionalen Bewertung erfolgen die einzelnen Bewertungen voneinander unabhängig. Erst die ordinale Klassenbildung nach einheitlichen Klassen realisiert die Kopplung der Untersuchungsziele. Dies erfolgt in Form einheitlicher Tabellen.

Subjektivität. Bewertungsverfahren haben grundsätzlich eine ihnen innewohnende Subjektivität. Diese hängt unmittelbar damit zusammen, wie viele Entscheidungen der Bewertende innerhalb des Verfahrens zu treffen hat. Gerade bei der Anwendung des polyfunktionalen Verfahrens sind dies sehr viele (Auswahl der Merkmale, Gewichtung der Merkmale, Klassenzuordnungen, Definition der Wirkungsfunktionen). Demzufolge ist hier von einer hohen Subjektivität zu sprechen. Diese wird auch dadurch nur gering gemindert, daß alle Entscheidungen nicht von Einzelpersonen, sondern von einem Expertengremium getroffen werden sollten. Bei dem multifunktionalen Verfahren finden sich weniger Ansätze

für subjektive Entscheidungen. Durch die Validierung der angewandten Verfahren wird von vornherein eine Verringerung der Subjektivität erreicht. Meßreihen und Berücksichtigung funktionaler Zusammenhänge objektivieren die Einschätzung. Ein wesentlicher Ansatzpunkt für Subjektivität bleibt die Datenerhebung. Insgesamt ist das polyfunktionale Verfahren weniger objektiv einzustufen als das multifunktionale Verfahren.

Fehlerquote. Um die den Verfahren anhängige Fehlerquote zu bestimmen, ist eine Validierung notwendig. Dies ist bei den multifunktionalen Verfahren gegeben. Dabei ist die Validierung in festgelegten Grenzen erfolgt. Darüber hinaus ist bei einer Anwendung der Verfahren keine gesicherte Ergebnisqualität zu erwarten. Beim polyfunktionalen Verfahren ist die Fehlerquote dagegen nicht einschätzbar, nicht zuletzt deshalb, weil quantifizierbare und damit vergleichbare Ergebnisse nicht erreicht werden und somit auch keine Validierung möglich ist.

Mögliche Anwendungsbereiche. Aus den oben beschriebenen Eigenschaften ergeben sich die Anwendungsgebiete beider Verfahren. Das polyfunktionale Verfahren ist grundsätzlich überall anwendbar. Dies gilt sowohl für die Auswahl der Funktionen als auch für unterschiedliche Maßstabsebenen. Das Verfahren ist maßstabsunabhängig. Grenzen sind allein durch die Datenauswahl gesetzt, wobei selbst hier diese Grenzen häufig umgangen werden können. Das multifunktionale Verfahren dagegen ist in seiner Einsatzfähigkeit durch die Validierung der Einzelverfahren begrenzt. Viele validierte Einzelverfahren liefern nur in begrenzten Maßstabsbereichen und unter bestimmten Bedingungen (geographische Lage des Untersuchungsraumes, begrenzte Merkmalsausprägungen) nutzbare Ergebnisse. Des weiteren kommt es auf die Vollständigkeit der Datengrundlagen an. Ein großes Problem bis heute besteht darin, daß es nicht genügend ausreichend validierte Bewertungsverfahren gibt, so daß nicht jede Zielvorstellung mit Bewertungsdaten unterstützt werden kann.

Rechentechnische Realisierung und Einbindung in GIS. Ein wesentlicher Punkt bei der Anwendung von Bewertungsverfahren ist die rechentechnische Umsetzung. Die Vielzahl der Daten und deren räumliche und zeitliche Zuordnung machen rechentechnische Hilfsmittel unersetzlich. Für die räumliche Interpretation und Bearbeitung werden heute Geographische Informationssysteme (GIS) verwendet. Dort lassen sich Daten visualisieren, die in einer gekoppelten Datenbank gespeichert sind. Das gilt auch für eine Vielzahl von für Bewertungen notwendigen Ausgangsdaten. Damit ergibt sich die Frage, ob sich die Bewertungen direkt mit

GIS ausführen lassen. Dies kann zumindest für die einzelnen validierten Bewertungsverfahren bejaht werden. In einem modernen GIS lassen sich viele (nicht alle notwendigen) Operationen programmieren und damit die Bewertungen durchführen (s. Abbildung 1.2-3). Gerade auch die anschließende qualitative Bewertung der Ergebnisse durch Zuweisung von Klassen ist im GIS leicht zu handhaben. Die Anwendung des polyfunktionalen Bewertungsverfahrens dagegen ist im GIS nicht durchführbar (Eingabe differenzierter Gewichte, Zugriff auf verschiedenste Wirkungsfunktionen u.a.). Hier besteht lediglich die Möglichkeit, die Ausgangsdaten aus einem GIS zu nehmen und die Ergebnisse dorthin zurückzuspeichern. Der Vorteil des polyfunktionalen Bewertungsverfahrens liegt in der besseren Möglichkeit zur rechentechnischen Bearbeitung, denn es muß nur ein Verfahren implementiert werden. Dieses Verfahren liegt als DOS-Programm vor (GRABAUM 1996a). Hier besteht allerdings ein weiterer Nachteil darin, daß die Daten für die Eingabe in dieses Programm erst in ein notwendiges (lesbares) Format gebracht werden müssen.

Bei der multifunktionalen Vorgehensweise verwenden alle Verfahren unterschiedliche Algorithmen, was eine Einzelimplementierung jedes Verfahrens im GIS notwendig macht. Hier können die Daten allerdings schon so aufbereitet werden, daß sie direkt für die Berechnungen verwendet werden können.

1.2.7 Fazit

Das polyfunktionale Bewertungsverfahren ist zwar leichter handhabbar und läßt sich auch bei nur ungenauer Datengrundlage anwenden, hat aber nicht zuletzt dadurch und durch die große innewohnende Subjektivität eine geringe fachliche Aussagekraft. Bei ausreichend verfügbarer Information und vorhandener validierter Einzelbewertungsverfahren ist das multifunktionale Verfahren dem polyfunktionalen Bewertungsverfahren unbedingt vorzuziehen. Nachteilig wirkt sich hier jedoch aus, das nur eine geringe Anzahl validierter Verfahren zur Verfügung steht. Deshalb und wegen der häufig mangelnden Datengrundlage ist der Rückgriff auf polyfunktionale Bewertung manchmal sinnvoll, um trotz der Schwächen dieses Ansatzes eine Grundlage für die Umsetzung zu definierender Leitbilder zu erhalten.

Tab. 1.2-1: Vergleich von polyfunktionaler und multifunktionaler Landschaftsbewertung (Überblick)

	polyfunktional	**multifunktional**
Ziel	bewertende Aussage über verschiedene Landnutzungen hinsichtlich der Erfüllbarkeit ausgewählter Naturfunktionen im Untersuchungsraum	
Vorgehen	alle Bewertungen mit einheitlichem Algorithmus	Durchführen voneinander unabhängiger Algorithmen
Algorithmus	Funktionsfestlegung, Merkmalsbaum, Klassenbildung, Merkmalsgewichtung, Wirkungsfunktionen, Ausprägungen, Kopplung durch Summation über Produkte	Funktionsfestlegung, Merkmalsausprägungen (Daten der eingehenden Faktoren), verschiedene Arten von Operationen
Merkmale/Faktoren	gemeinsame Merkmalsliste	für jede Funktion andere Merkmalsliste
Bedeutungsgewichtung	subjektiv vorzunehmen	steckt in der Bewertungsformel (in unterschiedlicher Form)
Merkmalsausprägungen	gemessene Daten, in (subjektive) Klassen eingeteilt	gemessene Daten, meistens direkt übernommen
Wirkungsfunktionen	linear, subjektiv	meistens nichtlinear, auf Meßreihen o.ä. beruhend
Bewertungsformel	simple Verknüpfung, spiegelt Realität ungenau wider	durch validierte Modellbildung meist genauere Widerspiegelung der Realität (in Grenzen)
Ergebnis	Klassen von Funktionsleistungsgraden, keine Quantifizierung möglich	quantitative Ergebnisse (meistens Mittelwerte), Umwandlung in Klassen von Funktionsleistungsgraden möglich
Kopplung der Funktionen (Multifunktionalität)	gemeinsame Merkmalsliste, einheitliche Bewertungsvorschrift, 5- oder 10-stufige Ergebnislisten (ordinale Skalierung)	Bewertungen voneinander unabhängig (keine Kopplung) Kopplung erst nach Bewertung durch Klassenbildung der Ergebnisse (ordinal)
Validität	keine Validierung möglich, da Ergebnisse nicht vergleichbar	in festgelegten Grenzen ausreichend validiert ?
Subjektivität	groß	geringer
Fehlerquote	nicht oder nur sehr beschränkt einschätzbar	abschätzbare Fehlerquote durch Validierung
Anwendungsbereiche	unbegrenzt	begrenzt durch Validierung (Maßstab, Region) und Datenverfügbarkeit
technische Realisierung	einheitliches Bewertungsprogramm im DOS-Format	jeder Algorithmus muß eigenständig programmiert werden
Bearbeitung im GIS	möglich, aber komplex	meist gut möglich
Empfehlung	wenig geeignet für exakte Untersuchungen	gut geeignet für Analysen und Weiterverwendung

1.3 Bewertung von Landschaftsstrukturen auf topischem Niveau zur Ableitung von Entwicklungszielen in Agrarlandschaften

Burghard Meyer

1.3.1 Einleitung

Der Landschaftsstrukturbegriff sollte im Kontext stehen mit den die Landschaft beschreibenden Begriffen der Flächennutzung, der Biotoptypen, der Nutzungs- und Strukturtypen und besonders der Naturräumlichkeit, d.h. mit der regional und standörtlich unterschiedlichen Kombination der Geoökofaktoren. Die Flächennutzung ist in der mitteleuropäischen Kulturlandschaft eng mit der wirtschaftlichen Tätigkeit des Menschen verbunden, da echte Naturlandschaften in Mitteleuropa nicht mehr existieren. Agrarlandschaften im mitteldeutschen Raum sind seit ihrer Entstehung mit der Waldrodung durch den Wandel der Anbausysteme und der stofflichen und maschinellen Anbaumethoden mehrfach verändert worden. Dieser Wandel kulminierte in der flächenhaften Ausräumung der Landschaften in den sechziger und siebziger Jahren dieses Jahrhunderts, die im Zusammenhang mit der Kollektivierung der Landwirtschaft in der DDR steht. Deshalb ist heute zur Begründung des Wiederaufbaus einer neuen Kulturlandschaft die Analyse und Bewertung von Landschaftsstrukturen dringend notwendig. Diese bezieht nicht nur die heutigen Landsschaftsstrukturen, beschrieben durch die Sekundären Landschaftsstrukturen, sondern auch die aus potentialorientierten Standortanalysen begründeten Primären Landschaftsstrukturen ein, die ein naturraumangepaßtes Raummuster der Flächennutzung begründen. Inwieweit die Sekundäre Landschaftsstruktur dem Ideal der Primären Landschaftsstruktur (als landschaftlichem Leitbild) entspricht, kann durch Landschaftsstruktur- und Umweltqualitätszielbewertungen ermittelt werden. Bewertungsergebnisse können mit GIS räumlich quantifiziert und in sinnvoller Kombination für die Leitbildableitung genutzt werden.

1.3.2 Topische Dimension und Bewertung

Unter Landschaftsstruktur wird die aus dem Erscheinungsbild des Raummusters und aus der haushaltlichen Funktion der Raumeinheiten zusammengesetzte, aus formalen und funktionalen Merkmalen bestehende Struktur einer Landschaft verstanden. Landschaftsstrukturen werden in abgeleiteten Maßen beschrieben. Grundlagendaten hierfür

liefern Geländeaufnahmen, Laboruntersuchungen, Kartenanalysen oder indirekte Verfahren wie Luftbildauswertung oder Satellitenbildverarbeitung. LESER (1991a) spricht in diesem Zusammenhang von semiquantitativen Daten, weil diese nicht als „wirkliche ökologische Kenngrößen" für die quantitative Bestimmung des Prozeß- und Umsatzgeschehens in Landschaftsökosystemen aus eigenen Feldanalysen bestimmt werden. Letztere sind aufgrund der Heterogenität der Landschaft ebenfalls selektiv und nicht generell verallgemeinerbar und meist nicht auf andere Landschaftsräume übertragbar. Darüber hinaus sind aus öffentlichen Primärdaten (Karten und Luftbildern) abgeleitete landschaftsstrukturelle Parameter besser reproduzierbar als durch aufwendige Meßprogramme gewonnene landschaftsökologische Grundlagendaten, die für eine erstmalige Modellformulierung und -validierung allerdings unabdingbar sind. Die Einengung der Landschaftsökologie auf „wirkliche ökologische Kenngrößen" führt bei konsequenter Beachtung dazu, daß bioökologische und statistische Verfahren, wie z.B. die Aufstellung von „Roten Listen" oder Diversitätsmaßen, nicht verwendet werden, da sie auf statistischen Aussagen, selektiven Betrachtungen bzw. der Analyse und Weiterverarbeitung schon bestehender Datenquellen beruhen. Dem widerspricht die flächenhafte Anwendung von Bewertungsansätzen in Wissenschaft und Praxis (FINKE 1994).

Die topische Dimension ist nach der Theorie der geographischen Dimensionen die landschaftsökologische Grundeinheit, für die von homogenen Inhalten ausgegangen wird und die „gleiche ökologische Verhaltensweisen zeigt" (LESER 1991a). Diese Homogenität bezieht sich nach dem sogenannten „Zweckmäßigkeitsgrundsatz" nur auf die wichtigsten Kompartimente des Systems, die eine in Intervallen zusammengefaßte Variation (mit gewissen Schwankungsbreiten) aufweisen dürfen. Es handelt sich um eine nicht eindeutige wissenschaftliche Übereinkunft, die besagt, welcher Maßstab als topisches Niveau zu betrachten ist. In der Literatur ist keine klare Maßstabsgrenze angegeben, die in diesem Zusammenhang für eine standortkonkrete und planerisch sinnvolle Aussage im Bereich 1-5.000-1:10.000 bis maximal 1:25.000 liegt. Wie bei allen geographischen Klassenbildungen sind fließende Übergänge in kleinere und größere Maßstäbe gegeben.

Bewertungen haben das Ziel, ökologische Erkenntnisse und funktionale oder strukturelle Beziehungen als Grundlage für politisches Handeln aufzubereiten. Allgemein werden (natur)wissenschaftliche Sachverhalte mit einer problemadäquaten Methode und maßstabsabhängiger Genauigkeit ermittelt und in unterschiedliche Klassen zusammengefaßt,

die anschließend mit nicht-naturwissenschaftlichen Qualitätsaussagen (gut bis schlecht oder ähnlich) verbunden werden, was häufig Gegenstand heftiger Kritik ist. Bei der weiteren Verarbeitung und Datenintegration verschiedener Bewertungsgegenstände werden zusätzlich vielfach Gewichtungen verwendet. Damit werden vergleichende Relativierungen zwischen tatsächlich schwer vergleichbaren Bewertungsgegenständen nach einer aus zusätzlichen Quellen (Literatur, Befragungen, Expertengespräche) ermittelten Bedeutung vorgenommen (z.B. der Bodenschutz wird mit dem Faktor 0,7 und der Grundwasserschutz mit dem Faktor 0,3 belegt). Besonders dieser letzte Integrationsschritt wird in der disziplinär orientierten Grundlagenforschung meist verweigert, was z.B. bei MARKS et al. (1992) mit nicht abschätzbaren Wechselwirkungen begründet wird.

Im topischen Maßstab ist die kleinste zu bewertenden Einheit der Landschaftsstuktur ein Landschaftselement, welches in der bewertenden Praxis mit einem Biotoptyp bzw. mit einer Einheit einer Flächennutzungskategorie gleichzusetzen ist. Für den Boden ist die kleinste Einheit eine Fläche gleichen Bodentyps (Pedotop), wobei jeweils eine ausreichende Homogenität vorausgesetzt wird. Darüber hinaus müssen flächenhafte, linienhafte und punktuelle Landschaftsstrukturen für die Verarbeitung mit Geographischen Informationssystemen (GIS) unterschieden werden.

Landschaftsstrukturanalysen und -bewertungen werden heute vorgenommen, um einen Beitrag zur Definition von Umweltqualitätszielen für die Leitbilddiskussion zu leisten. Zur regionalen Konkretisierung des Idealbildes eines ländlichen Raumes (Abbildung 1.3- 1) nach MANDER et al. (1988) sind zur Bewertung der Landschaftsstruktur folgende wesentliche Inhalte mit den Begriffen der Primären und der Sekundären Landschaftsstruktur, der Connectivity und der Landschaftsdiversität beschreibbar. Diese Sichtweise wurden von JEDICKE (1991) in seinem Biotopverbundkonzept zusätzlich durch ein Gebot der flächenhaften stofflichen Extensivierung ergänzt, wodurch der funktionale Ansatz der Landschaftsbewertung mit den strukturell orientierten Ansätzen verbunden wird.

MANDER et al. (1988) gehen auf Basis der Ökotontheorie davon aus, daß die Ökologische Diversität einer Landschaft (Landschaftsdiversität) durch eine mehrstufige Struktur von Ökotonen, von differenziert standortgerecht bewirtschaften Flächen und einem Netzwerk von sogenannten Kompensationszonen gewährleistet sei, die auch möglichst wenig durch Straßen und Siedlungen gestört sind. Die Ermittlung und Begründung der dafür notwendigen

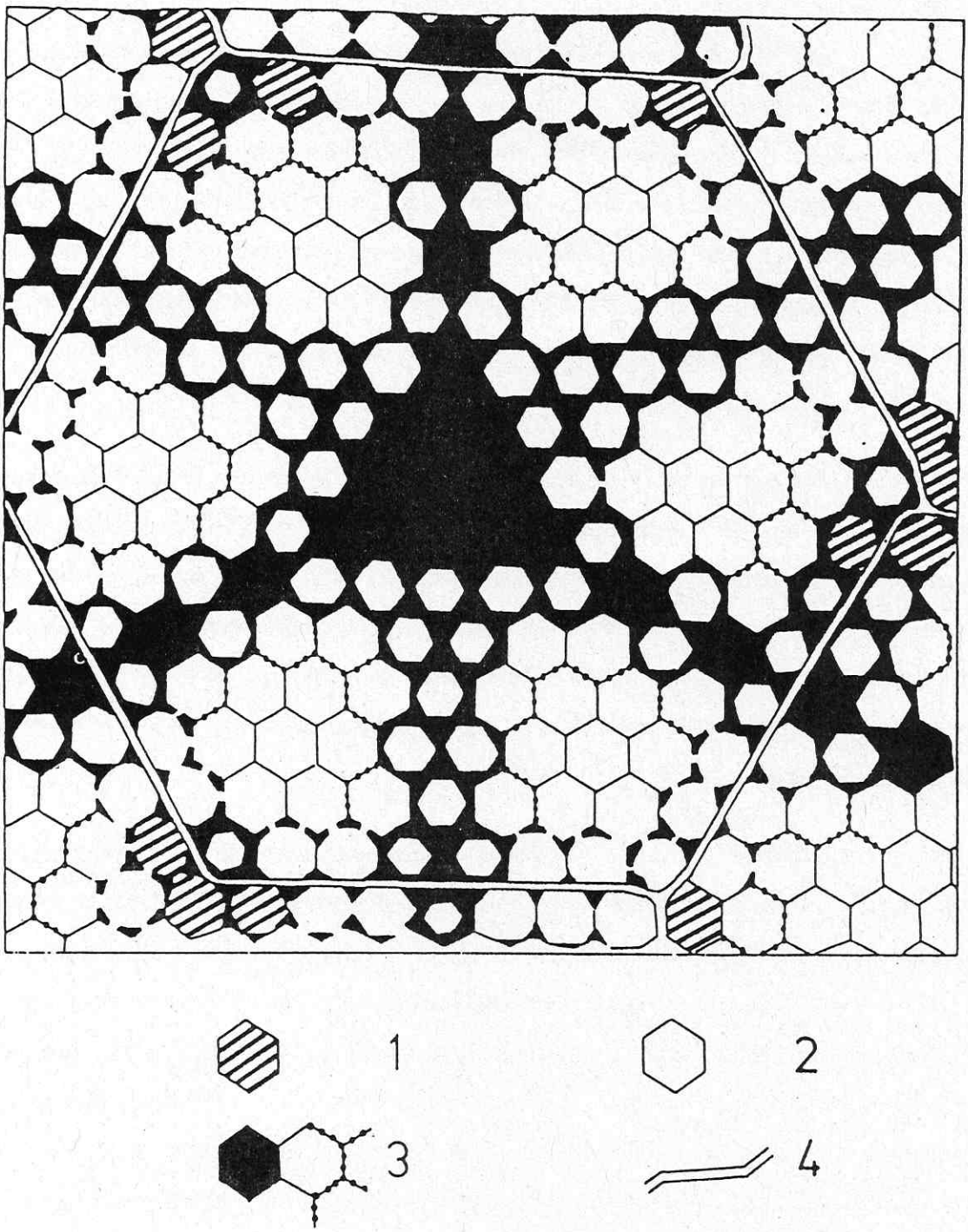


Abb. 1.3-1: Schema der Idealstruktur eines ländlichen Raumes (nach MANDER et al. 1988)

Es bedeuten: 1 = städtische Zonen; 2 = Felder; 3 = Ausgleichszonen (Wald, Sümpfe, Gehölze, Hecken, Schutzstreifen etc.); 4 = Hauptstraßen.

Landschaftsstrukturen bezieht sich auf theoretisch sechseckige Felder und ihre landschaftsstrukturelle Umgebung. Die Ausgestaltung dieser theoretischen Flurauftteilung ist in der realen Landschaft regional aber höchst unterschiedlich und muß deshalb auf topischem Betrachtungsniveau genauer untersucht werden.

1.3.3 Primäre und Sekundäre Landschaftsstruktur

In den folgenden Abschnitten werden am regionalen Fallbeispiel von vier im Raum Halle-Leipzig lokalisierten Untersuchungsräumen, die in unterschiedlichen Naturräumen liegen und eine Flächenausdehnung zwischen 36 und 47 km² haben, Landschaftsstrukturanalysen aufgezeigt und damit zusammenhängende Probleme diskutiert. Auf topischem Niveau werden die Primäre und die Sekundäre Landschaftsstruktur unterschieden. Hinter diesen Begriffen stehen die Inhalte der Naturräumlichkeit, die die Grundlage für alle Planungen sein sollten, da die Flächennutzung heute nur noch wenig an diese angepaßt ist.

Die ***Primäre Landschaftsstruktur*** (Db) ist durch die Verteilung von Geoökofaktoren, im Beispiel vereinfachend durch die Heterogenität der Bodendecke gekennzeichnet. Diese gibt die naturräumlich und landschaftsgenetisch bedingten lokalen Standortbedingungen wieder. Diese Primäre Landschaftsstruktur wird aus einer Bodenkarte des Maßstabes 1:10.000 abgeleitet. Sie kann durch die Bodendiversität gemessen werden (Abb. 1.3-2).

Die Berechnung der Primären Landschaftsstruktur (Db) bezieht die Größe des Untersuchungsraumes, die Anzahl der Bodenareale und unterschiedlichen Bodenarten, den Kontrast der Bodenarten und die Grenzlinienlängen zwischen den Bodenarten in die Berechnung ein. Das Ergebnis ist ein in m/ha quantifizierbares Diversitätsmaß, welches nur für Landschaften angewandt werden kann, um statistischen Grundprinzipien gerecht zu werden. Die Anzahl der Landschaftselemente sollte deshalb nicht geringer als n = 100 sein. Besser sind deutlich größere Grundgesamtheiten.

Die *Sekundäre Landschaftsstruktur* (D) ist die vom Menschen geschaffene Flächennutzung in Form von Landschaftselementen (Biotoptypen geordnet nach Hauptnutzungen). Sie wird durch den Indikator der Ökologischen Diversität (Landschaftsdiversität) gemessen und über die Ausgliederung von Biotoptypen als sekundäre Landschaftselemente im Maßstab 1:10.000 quantifiziert. Für unterschiedliche Zeitschnitte, z.B. für historische Referenzzeiträume, können verschiedene Sekundäre Landschaftsstrukturen bestimmt werden (Abb. 1.3-3). In die

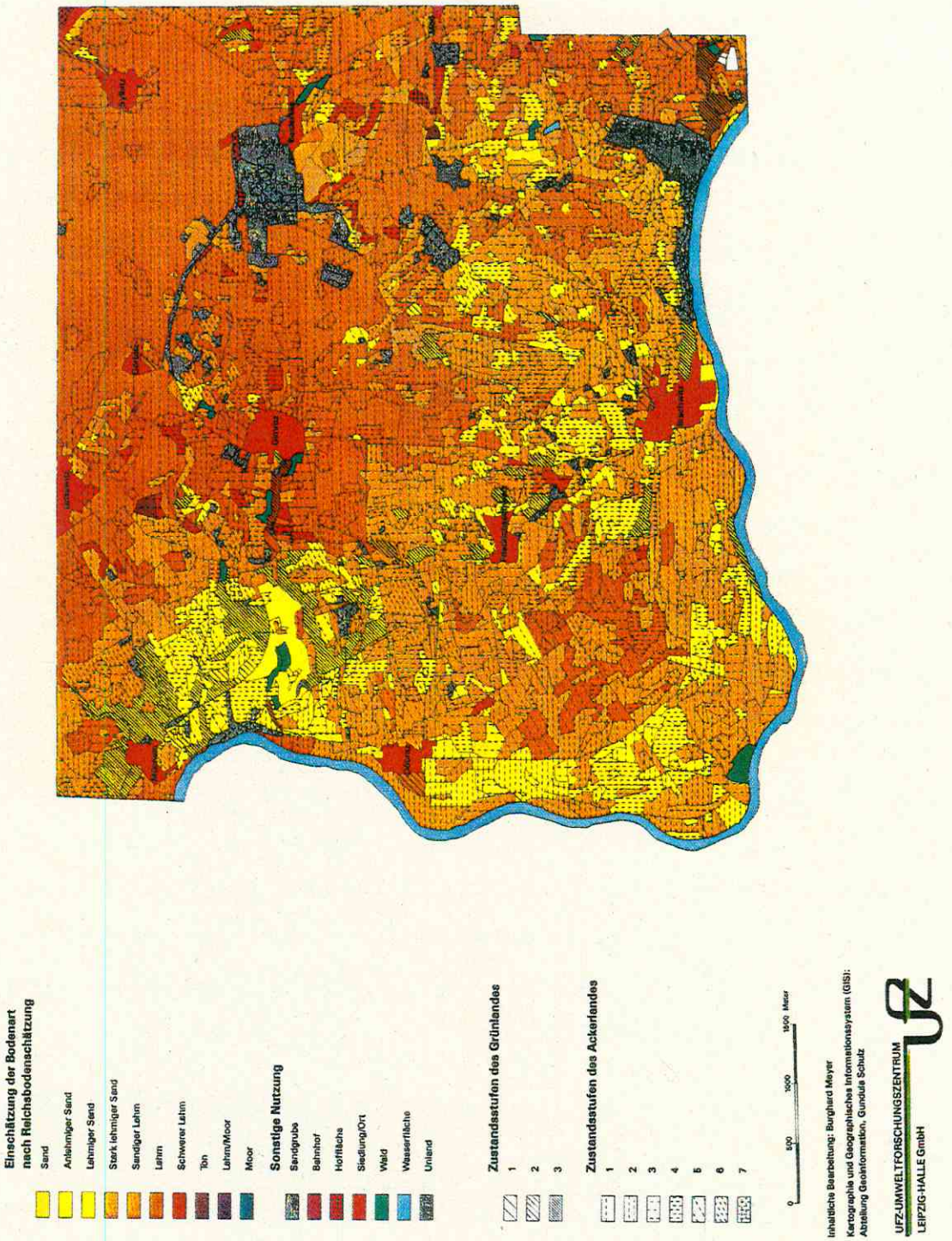


Abb. 1.3-2: Untersuchungsraum Gimritz: Ausschnitt der digitalisierten Bodenschätzungskarte (1936) im Originalmaßstab 1:10.000

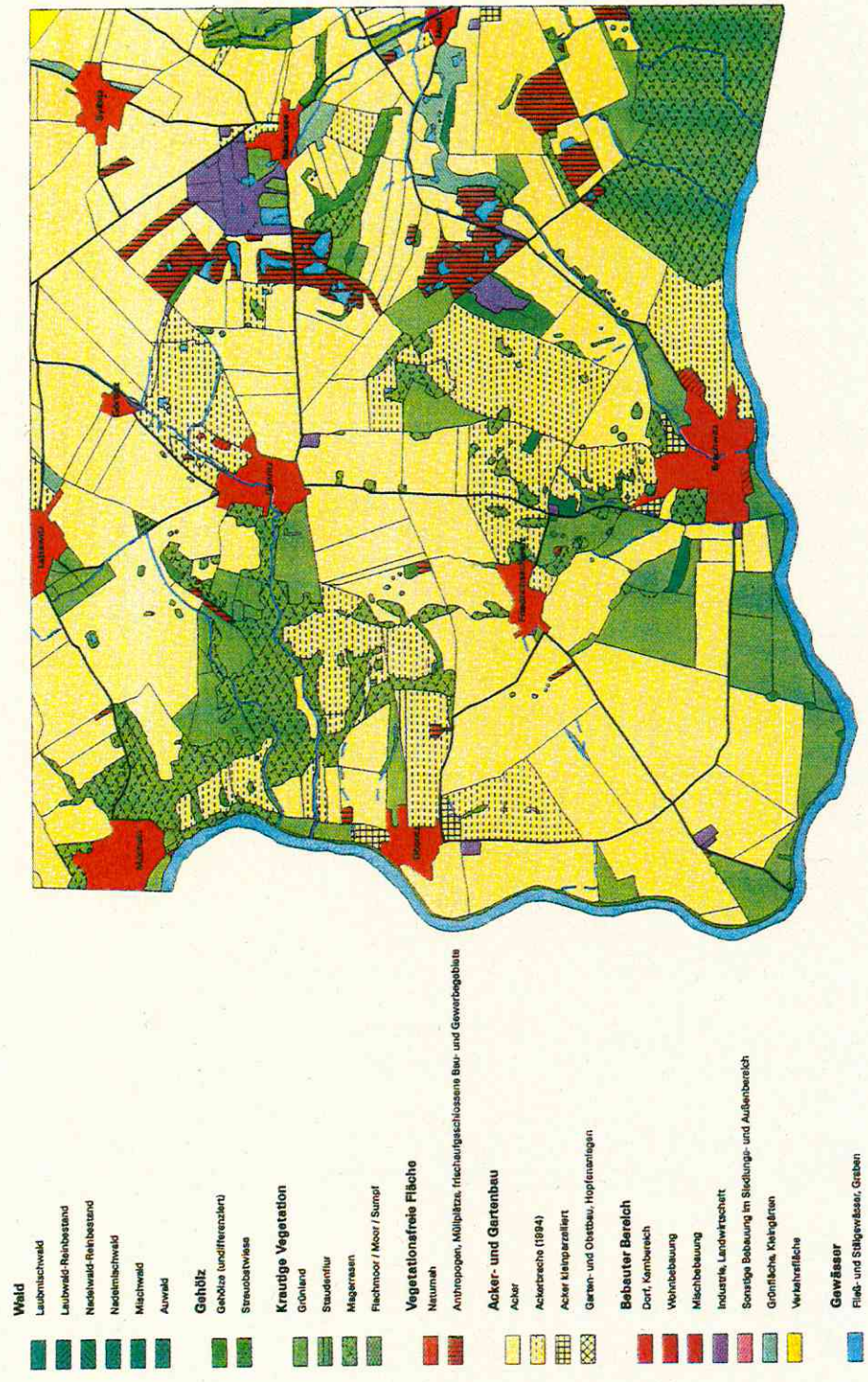


Abb. 1.3-3: Untersuchungsraum Gimritz: Biotoptypenverteilung nach eigener Kartierung (1994) im Originalmaßstab 1:10.000. Der Vergleich der Karte mit Abb. 1.3-2 zeigt die bodenkundliche Heterogenität der Standorte unter agrarischer Nutzung und die Ausdehnung der Wohn- und Bergbauflächen zwischen 1936 und 1994.

Berechnung gehen ähnlich der Primären Landschaftsstruktur alle flächenhaften Landschaftselemente ein, wobei wiederum durch die Einbeziehung der Flächengröße des Untersuchungsraumes, der Anzahl unterschiedlicher Biotoptypen, der Länge der Ökotone und dem Anteil der Flächen ein Diversitätsindex berechnet werden kann.

Das **primäre Landschaftsstrukturpotential** quantifiziert in ländlichen Räumen das Ziel der Angleichung der Sekundären an die Primäre Landschaftsstruktur. Die Differenz zwischen beiden ist das unausgeschöpfte Landschaftsstrukturpotential (Tabelle 1.3-1), welches durch den Vergleich dieser beiden Landschaftsdiversitätsindikatoren zur Ableitung einer standortangepaßten regional gemessenen Diversität in Agrarlandschaften herangezogen werden kann und in seiner absoluten Höhe die Länge der fehlenden Strukturen wiedergibt. Die in Tabelle 1.3-2 angegebene Einstufung der Notwendigkeit von Maßnahmen zur Landschaftsdiversitätsverbesserung ist regional sehr unterschiedlich und naturraum-, nutzungs- und kulturabhängig.

Tab. 1.3-1: Bilanz des Diversität der Sekundären (D) und der Primären Landschaftsstruktur (Db) in vier Untersuchungsräumen im Raum Halle-Leipzig (in 100 m/ha) (MEYER 1997)

Landschaft	D (Sekundäre LS)	Db (Primäre LS)	Defizit (Ddiff) = primäres Landschafts-strukturpotential
Jesewitz	1,57	2,80	-1,23
Nerchau	1,73	2,31	-0,58
Barnstädt	1,14	2,25	-1,13
Gimritz	1,57	3,19	-1,62

Tab. 1.3-2: Einstufung der Notwendigkeit von Maßnahmen zur Landschaftsdiversitätsverbesserung in Agrarlandschaften (A) und Agrarlandschaften mit geringem Waldanteil (AW) (MEYER B.C. 1996)

Klasse	Defizit D/Db	Einstufung
1	0 - 0.4	mittel
2	0.4 - 0.8	mittel - hoch
3	0.8 - 1.2	hoch
4	1.2 - 1.6	sehr hoch
5	> 1.6	besonders hoch

Für die Bewertung sollten unterschiedliche (regionale) Werte in eine praktischerweise fünfstufige Skalierung eingeordnet werden, die im Beispiel sowohl das Maß der Heterogenität einer Agrarlandschaft als auch die allgemeine Höhe des Heterogenitätsindizes bewertend

einbezieht. Für Agrarlandschaften des Beispielsraumes ist die Problematik der Bodenheterogenität auf großen Schlägen für die zukünftige Nutzung ausschlaggebend, welche z.B. in der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortskartierung (MMK) durch chorische Homogenisierung der Darstellung von Bodenformengesellschaften im Maßstab 1:100.000, d.h. durch die Größe des als Bezugsgrundlage genommenen Landschaftselementes, nicht dargestellt werden kann. Für andere Regionen können die Einstufungen in Tabelle 1.3-2 durchaus anders gesetzt werden, da D theoretisch auch höhere Werte als DB annehmen kann.

1.3.4 Regionale Landschaftsstrukturbewertungen und Umweltqualitätsziele

Auf Basis der in Tabelle 1.3-3 aufgeführten digitalen Datenebenen wurden vom Autor weitere Landschaftsstrukturanalysen erarbeitet, deren Quantifizierung mit Geographischen Informationssystemen (GIS) ebenfalls nur in ausreichend großen, statistisch aussagekräftigen Räumen (z.B. Landschaftseinheiten oder Naturräumlichen Einheiten) vorgenommen werden kann. Auf eine ausführliche Darstellung wird in diesem Zusammenhang verzichtet (MEYER 1997).

Tab. 1.3-3: Für regionale Landschaftsstrukturbewertungen verwendete Datenebenen im GIS in vier Untersuchungsräumen (MEYER 1997)

Jesewitz	Nerchau	Gimritz	Barnstädt
Biotoptypen -linienhafter Art -flächenhafter Art	Biotoptypen -linienhafter Art -flächenhafter Art	Biotoptypen -linienhafter Art -flächenhafter Art	Biotoptypen -linienhafter Art -flächenhafter Art
Bodenarten -Zustandsstufen -Geol. Entstehung Bodenformen-gesellschaften	Bodenarten -Zustandsstufen -Geol. Entstehung Bodenformen-gesellschaften	Bodenarten -Zustandsstufen -Geol. Entstehung	Bodenarten -Zustandsstufen -Geol. Entstehung
Gewässernetz 1936 Gewässernetz 1990	Gewässernetz 1936 Gewässernetz 1990	Gewässernetz 1936 Gewässernetz 1990	Gewässernetz 1936 Gewässernetz 1990
Straßen und Wege 1936 Straßen und Wege 1990	Straßen und Wege 1936 Straßen und Wege 1990	Straßen und Wege 1936 Straßen und Wege 1990	Straßen und Wege 1936 Straßen und Wege 1990
historische Land-nutzung 1936 Geländemodell Hanglängen			

Vom Verfasser wurden auf Basis der in Tabelle 1.3-3 aufgeführten Datenebenen regionalisierte Umweltqualitätsziele abgeleitet, die kurz dargestellt werden.

Als wesentliche Umweltqualitätsziele wurden formuliert:

1. Ein Flächenanteil von mindestens 15 % „naturschutzrelevanter Flächen" in Intensivagrarlandschaften entsprechend normativer Forderungen des Naturschutzes unter Berücksichtigung des in der Realität meist wesentlich geringeren Anteiles solcher Flächen.
2. Eine Angleichung des Bodenarten-Ackerflächen-Verhältnisses (BAV) an den BAV-Wert 1:1 als Ziel für eine an die Standörtlichkeit der Landschaft angepaßte Schlaggröße, die dauerhaft umweltgerecht landwirtschaftlich genutzt werden kann, was in Einklang mit der in Abschnitt 4 dargestellten Landschaftsdiversität steht.
3. Eine potentielle Rainlänge in Agrarlandschaften entsprechend der Länge markanter Bodengrenzen in den Landschaften, die regional unterschiedlichen Längen anzulegender Hecken und Raine begründet.
4. Eine Angleichung der sekundären Landschaftsstruktur an die primäre Landschaftsstrukur, d.h. die Erhöhung der Landschaftsdiversität bis zu einer landschaftsangepaßten potentiellen Landschaftsdiversität. Hierfür ist häufig ein Flächennutzungswandel notwendig.
5. Die Angleichung der Gewässerlänge des Gewässernetzes mindestens an den (datentechnisch) gut belegbaren Zustand des Jahres 1935-36.
6. Die Minderung der weiteren Ausdehnung des Straßennetzes.

Mit dieser Auswahl von Umweltqualitätszielen können verschiedene linien- und flächenhafte Strukturen begründet werden, die die landschaftsstrukturellen Probleme in Agrarlandschaften mindern können. Ihr Einfluß auf die Habitatfunktionen für Fauna und Flora sind aber heute nur ansatzweise bestimmbar. Deshalb sollten für eine ganzheitliche Agrarlandschaftsentwicklung zusätzlich flächenhafte landschaftsfunktionale Bewertungsansätze (Stoffhaushalt, Regulationsfunktionen) herangezogen werden, die jedoch in vielfacher Beziehung mit Landschaftsstrukturen stehen und auch stark von der Nutzungsstruktur geprägt sind.

1.3.5 Vor- und Nachteile von Landschaftsstrukturbewertungen

Wie bei allen die Umwelt beschreibenden und einstufenden Bewertungen sind für die Anwendung eine Vielzahl von methodischen Problemen zu beachten, die mit der Auswahl des problemadäquaten Bewertungsverfahrens beginnen. Die wichtigsten Problembereiche lassen

sich mit den Stichworten der Selektivität, der funktionalen Aussagefähigkeit und den häufig lückenhaften oder fehlenden Datengrundlagen zusammenfassen:

1. Die Selektivität einzelner Bewertungsverfahren (z.B. der Streuobstwiesenkartierung) gibt zwar einen guten Überblick über eine Detailstruktur innerhalb einer Landschaft in bezug z.B. auf spezielle schützenswerte Biotope. Die starke Spezialisierung der Aussagen läßt aber kaum Verallgemeinerungen für eine Region zu.
2. Landschaftsfunktionale Auswirkungen von linearen Landschaftsstrukturen wie Hecken, Raine etc. sind bis heute nur indirekt quantifizierbar und aussagefähig. So kann z.B. nur der Einfluß einer idealtypischen Hecke auf die Bodenerosion durch Wind bestimmt werden, der allerdings nur indirekt funktional wirkt. Das gleiche gilt für die nur mit hohem Aufwand abschätzbare Wirkung der Hecke auf die Habitatfunktion für Nützlinge in der Agrarlandschaft.
3. Problematisch ist die Bereitstellung von landschaftsstrukturell aussagekräftigen öffentlichen Datengrundlagen, die heute meist nicht (digital) verfügbar sind. Allerdings bieten die aktuell in fast allen Bundesländern durchgeführten flächendeckenden Biotoptypenkartierungen mit CIR-Luftbildern gute Ansatzpunkte für die regionale Quantifizierung von Landschaftsstrukturen in ausreichend großen Räumen, wie sie für die statistisch abgesicherte Berechnung von Diversitätsindizes notwendig ist. Dafür ist eine ausreichende statistische Grundgesamtheit erforderlich.

Diesen genannten lösbaren und überwindbaren Problemen stehen wesentliche Vorteile gegenüber, die mit den technisch neuen Möglichkeiten der Quantifizierung mit GIS, der regionalen Datenintegration und der Vergleichbarkeit beschrieben werden können:

1. *Quantifizierung mit GIS*: Die oben dargestellten Landschaftsstrukturquantifizierungen und die Anwendung der Ökotontheorie in der Planung ist nur durch die Ableitung von räumlich quantifizierten Daten möglich, die die Quantifizierung der strukturellen Raummuster zulassen. Dies sind bisher nur ansatzweise bekannte oder unbekannte Größenordnungen, die z.B. in den Listen der schützenswerten oder gefährdeten Biotoptypen (z.B. RIECKEN, RIESS & SSYMANK 1994) für spezielle Fragestellungen, aber nicht für allgemeine Landschaftsstrukturbetrachtungen bekannt sind.

2. *Regionale Datenintegration*: Diese Landschaftsstrukturquantifizierungen ermöglichen erstmalig Aussagen über die Primäre Landschaftsstruktur und die Landschaftsdiversität von größeren Testräumen oder Regionen sowohl für lineare als auch für flächenhafte Landschaftsstrukturen. Dadurch ist auch die Vergleich- und Bewertbarkeit einzelner Strukturparameter (z.B. der Grünlandanteil in der historischen Kulturlandschaft mit der Primären Landschaftsstruktur) möglich. Erst hierdurch werden Umweltqualitätsziele regional bewertbar.
3. *Vergleichbarkeit:* Die Erklärbarkeit und Nachvollziehbarkeit von Eingriffen in die Landschaftsstruktur wird durch die Vergleichbarkeit quantitativer regionaler und lokaler Daten stark verbessert. Ein wesentlicher Vorteil dabei ist z.B. die Betroffenheitssteigerung (z.B. der Hinweis, daß in bezug auf ein quantifizierbares Vergleichsjahr bereits 95 % eines Biotoptyps oder einer Landschaftsstruktur zerstört wurden und als Umweltqualitätsziel mindestens 10% wieder renaturiert werden sollten), die für die Erklärung und Umsetzung in der Praxis sehr bedeutend ist.

Die Methodik der Bewertung regionaler Landschaftsstrukturen steht noch ganz am Anfang ihrer Entwicklung. Für die Gestaltung von ausgeräumten Intensivagrarlandschaften und die Ableitung von Umweltqualitätszielen kann heute nicht mehr auf die Anwendung Geographischer Informationssysteme verzichtet werden, da erst durch deren Anwendung neue Möglichkeiten der Landschaftsstrukturbewertung ermöglicht werden. Auf diesem Wege werden heute völlig offenen Fragen, z.B. der an eine Region angepaßten Landschaftsdiversität, der Quantität notwendiger Landschaftsstrukturen, eines notwendigen Grünlandanteiles oder an die Landschaft angepaßter Schlaggrößen und Schlagformen gelöst werden können.

1.4 Konzept der ökologisch-ökonomischen Bewertung von erneuerbaren Ressourcen - dargestellt am Beispiel des Grundwasserschutzes im Torgauer Raum

Helga Horsch und Bengt Mansson

1.4.1 Einleitung

Der Grundwasserschutz ist ein wesentlicher Bestandteil einer nachhaltigen Entwicklungsstrategie. Während das mengenmäßige Wasserdargebot in der Bundesrepublik Deutschland als ausreichend eingeschätzt wird, hat sich die Qualität vor allem des oberflächennahen Grundwassers inzwischen besorgniserregend verschlechtert. Als punktuelle Gefährdungsquellen erweisen sich Altlasten, Industrieanlagen und undichte Kanalisationen. Diffuse Einträge werden vor allem durch den Straßenverkehr und die intensive Landbewirtschaftung verursacht. Allerdings sind die Neubildung des Grundwassers, seine ökologische Belastbarkeit und Nutzungsintensität regional sehr unterschiedlich. Insofern ist ein regionaler Ansatz zur Begründung von Grundwassernutzung und -schutz berechtigt. Aus ökonomischer Sicht geht es um die optimale Nutzung bzw. den optimalen Ressourcenschutz. Der „laissez faire" Markt kann diesen Anspruch für öffentliche Güter, worunter auch die Ressource Grundwasser zählt, und die dafür erforderliche Langzeitbetrachtung nicht erfüllen. Es sind staatliche Entscheidungen vorzubereiten, um den Ausschluß grundwasserbelastender und die Förderung grundwasserverträglicher Nutzungen zu unterstützen. Als eine Entscheidungsgrundlage ist die Bewertung von Handlungsoptionen ex ante und/oder ex post erforderlich. Die zu Grunde zu legenden Zielkriterien bestimmen jedoch wesentlich den Bewertungsansatz. Wird vom Paradigma einer nachhaltigen Entwicklung ausgegangen, ist vor allem zu beantworten, wie der Erhalt des Naturkapitals in die Bewertung zu integrieren ist.

Ausgehend von aktuellen Problemen des Grundwasserschutzes im Torgauer Raum wird die Frage nach ihrer Bewertung vor allem aus ökologischer und ökonomischer Sicht gestellt. Es werden die state-of-the-art-Verfahren zur Bewertung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen sowie ihre Defizite aus der Sicht des Nachhaltigkeitskonzeptes aufgezeigt und ein diesem Konzept entsprechender Ansatz zur Bewertung des Grundwasserschutzes vorgestellt.

1.4.2 Problemsituation im Torgauer Raum

Die Erarbeitung eines die Ökologie und Ökonomie integrierenden Bewertungsverfahrens ist ein Schwerpunkt des 1997 begonnenen FuE-Projektes des Umweltforschungszentrums zum Thema „Nachhaltige Wasserbewirtschaftung und Landnutzung in Flußlandschaften". Die

beispielhafte Anwendung erfolgt für den Torgauer Raum. Das Untersuchungsgebiet entspricht mit seinen ca. 700 km² weitestgehend dem Altkreis Torgau und gehört zum Regierungsbezirk Westsachsen. Im Norden grenzt der Altkreis an das Bundesland Sachsen-Anhalt und im Osten an Brandenburg an. Naturräumlich umfaßt er die Torgauer Elbtalwanne, die Dübener/Dahlener Heide sowie die Annaberger Heide. Der Altkreis Torgau ist vor allem ein ländlich geprägter Raum und durch einen Interessenkonflikt zwischen Gewässerschutz und Wirtschaft geprägt.

Der Gewässerschutz dient vor allem der Sicherstellung der Trinkwasserversorgung (LA TORGAU-OSCHATZ, 1995). Im Torgauer Raum befinden sich zwei Wasserwerke, die zum Verbund der Fernwasserversorgung Elbaue - Ostharz GmbH gehören. Die Kapazität dieses Verbundes beträgt gegenwärtig über 600.000 m³ Trinkwasser pro Tag, womit etwa 3,5 Millionen Menschen in Mitteldeutschland versorgt werden können. Allein die potentielle Tagesleistung der Torgauer Wasserwerke (Torgau-Ost und Mockritz) beträgt über 40% des Gewinnungspotentials des Verbundes. Die Trinkwassergewinnung im Torgauer Raum basiert auf Grundwasser und Uferfiltrat mit einem ungefähren Anteil von jeweils 50%. Die sich nördlich von Torgau befindenden Wasserfassungen sind allerdings durch militärische Altlasten auf dem ehemaligen WASAG - Gelände gefährdet. Zur Zeit erfolgt nach dem Sächsischen Altlastenprogramm die Gefährdungsabschätzung sowie die Begründung von Sanierungszielen und -maßnahmen. Des weiteren ist der Torgauer Raum durch Vorranggebiete für den Abbau oberflächennaher Rohstoffe (Kies) charakterisiert (LA TORGAU-OSCHATZ, 1995), die entsprechend dem Entwurf des Regionalplanes Westsachsen zugleich als Vorbehaltsgebiete für die Trinkwasserversorgung ausgewiesen sind.

Etwa 33% des Untersuchungsraumes sind Trinkwasserschutzgebiete. Damit sind kostenerhöhende Auflagen und Einkommensverluste infolge Nutzungsbeschränkungen verbunden, die als hemmend für die ökonomische Entwicklung empfunden werden. Daraus resultierende Überlegungen sind z.B. Entschädigungen für auflagenbedingte Kostenerhöhungen oder Veränderungen der Trinkwasserschutzzonen. Insbesondere die Festsetzung der Wasserschutzzonen entsprechend dem Sächsischen Wassergesetz vom 23.02.1993 unterstützt die Diskussion zur Reduzierung der Wasserschutzgebiete. Hintergründe einer solchen Diskussion sind vor allem die rückläufige Entwicklung des Trinkwasserverbrauches und die im Wasserschutzgebiet liegenden Flächen mit Altlasten, welche z.B. durch TNT-belastete Böden das Grundwasser gefährden. Eine solche auf die

Schutzzonenausweisung ausgerichtete Diskussion wird allerdings dominiert durch die ausschließliche Betrachtung des Grundwassers als Ressource für die Trinkwasserversorgung und der daraus resultierenden Sicherstellung durch einen räumlich differenzierten Grundwasserschutz. Diese Diskussion ist einmal um Möglichkeiten einer nachhaltigen Wirtschaftsweise der Verursacherbereiche von Grundwasserbelastungen (gewässerverträgliche Landnutzungen) zu erweitern. In der verursacherbezogenen Reduzierung der Gefährdungspotentiale wird ein wesentlicher Baustein einer nachhaltigen Wasserbewirtschaftung gesehen (MEYER, 1996, S. 78, s.a. Meyer et al. 1995), wofür bisher nur Ansätze existieren. Zum anderen ist zu berücksichtigen, daß der Grundwasserschutz nicht nur aus der Sicht der Sicherstellung der Trinkwasserversorgung sondern auch bezüglich seiner Funktionen im Wasserhaushalt und im Ökosystem zu beurteilen ist.

Das bedeutet, daß die für den Torgauer Raum zu betrachtenden Optionen des Grundwasserschutzes, die mit der aktuellen Problemlage korrespondieren, für das gesamte Spektrum möglicher Funktionen des Grundwassers zu bewerten sind. Entsprechend der aktuellen Problemlage sind folgende Optionen zu beurteilen:

- Anpassung der Wasserschutzgebietsausweisung an den bestehenden oder künftigen Bedarf der öffentlichen Wasserversorgung.
- Ausgliederung von Flächen mit Altlasten aus dem Wasserschutzgebiet und/oder Sanierung.
- Landnutzungsänderungen in Richtung grundwasserverträglicher Wirtschaftsweisen wie z.B. durch Agroforstwirtschaft.

Unter Berücksichtigung der Gesamtheit möglicher Funktionen des Grundwassers sind vor allem folgende, bewertungsrelevante Fragen zu beantworten:

- Wie ist der Grundwasserschutz aus kurz- und langfristiger Sicht zu bewerten? Was ist unter einer nachhaltigen Grundwassernutzung zu verstehen? Wie ist sie auf Grund eines „Marktversagens" zu bestimmen? Ist der Grundwasserschutz räumlich differenziert oder flächendeckend zu sichern?
- Was gehört zu den internen und externen Nutzen und Kosten des Gewässerschutzes? Wie sind sie bestimmbar? In welcher Größenordnung existieren sie und inwieweit können die externen Effekte internalisiert werden? Inwieweit sind Langzeitkalküle in die Bewertung

zu integrieren? Ist ein ökonomisch effizienter Grundwasserschutz in den ökologisch-ökonomisch determinierten Grenzen bestimmbar?

- Sind Entwicklungen zu erwarten, die zur Reduzierung der trade-off zwischen Gewässerschutz und Wirtschaft führen? Wodurch werden diese Entwicklungen bestimmt und wie sind sie zu bewerten?
- Werden die Kosten des Grundwasserschutzes verursachergerecht getragen?

Im folgenden wird aufgezeigt, welche Bewertungsverfahren existieren bzw. in welcher Richtung sie weiterentwickelt werden müssen, um schließlich eine Antwort für Strategien und Maßnahmen eines nachhaltigen Grundwasserschutzes geben zu können.

1.4.3 State-of-the-art-Verfahren

Die state-of-the-art-Verfahren für Umweltschutzmaßnahmen und darin eingeschlossen von wasserbezogenen Projekten basieren auf Nutzen-Kosten-Analysen (NKA). Das Ziel dieser Analysen besteht insbesondere darin, ökonomische Entscheidungen auf der Basis der Konsumentensouveränität, die über Marktwerte nicht in Erscheinung tritt, vorzubereiten.
Erste Nutzen-Kosten-Analysen zu wasserbezogenen Projekten sind auf das Jahr 1808 zurückzuführen. Sie wurden vor allem als Instrument zur Bewertung staatlicher Infrastrukturprojekte herangezogen. Meilensteine der Entwicklung von NKA's in den U.S.A. gehen aus der Tabelle 1.4-1 hervor (GRAMLICH, 1991, HANLEY et al., 1995).

Tab. 1.4-1: Entwicklung der NKA wasserbezogener Projekte in den U.S.A.

Jahr	Beispielhafte Arbeiten bzw. Dokumente zur Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)	Schwerpunkt der NKA
1808	A Gallatin Report on Transportation and Water.	Wasserquantität
1960	Resources for the Future: Water Resources Programme.	Wasserqualität
1966	CLAWSON, M. & J.L. KNETSCH: Economics of Outdoor Recreation.	Multifunktionalität der Wasser-ressource aus der Sicht von „use-value"
1967	KRUTILLA, J.: Conservation Reconsidered.	Multifunktionalität der Wasser-ressource aus der Sicht von „use-and non-use values"
1980	Presidential Executive Order 12291.	Anwendung der NKA bei neuen Gesetzen

Bis zum Jahre 1960 dominierten Bewertungsfragen, die auf die Wasserquantität fokussiert waren (Staudammbauten). Seit 1960 ist eine Schwerpunktverlagerung in Richtung Wasserqualität zu beobachten. Eine Rolle spielte vor allem die ökonomische Effektivität der Bereitstellung von Wasser in entsprechender Qualität. CLAWSON und KNETSCH machten sich vor allem verdient durch einen Bewertungsansatz, der die Multifunktionalität der Wasserressource berücksichtigt. Diese reduzierte sich jedoch auf „use-values". Bereits 1967 wurden Arbeiten mit einem multifunktionalen Bewertungsansatz publiziert, dem „use-values" und „non-use-values" zu Grunde lagen. Die theoretischen und methodischen Ansätze fußen im wesentlichen auf den Arbeiten von KRUTILLA (1967) und KRUTILLA & FISHER (1975). KRUTILLA und FISHER entwickelten einen Bewertungsansatz, der die individuelle Nutzensstiftung nicht nur auf den Erlebniswert (use-value) reduziert. Sie begründeten altruistisches Verhalten, was den Existenz- und Vermächtniswert (non-use-value) erklärt, sowie ein Verhalten, das auf Risikoabwehr und Aufschub möglicher irreversibler Entscheidungen gerichtet ist und im sogenannten Optionswert zum Ausdruck kommt (HAMPICKE, 1992, HÜBLER et al., 1992).

In diesem Zusammenhang wurden Methoden entwickelt, die bereits eine Bewertung aus einer längerfristigen Sicht einschließen. Die Langzeitbetrachtung ist vor allem dem dynamischen Charakter des ökonomischen Wertes geschuldet, der anthropogen aber auch naturbedingt ist. Dies beruht einmal auf dem sich verändernden Leistungspotential der erneuerbaren Ressourcen. Zum anderen verändern sich die individuellen Nutzensstiftungen z.B. infolge zunehmender Knappheiten spezifischer Funktionen bzw. Leistungen der Naturressourcen oder infolge sich verändernder Präferenzen. Des weiteren ist in Betracht zu ziehen, daß in der Regel der Nutzen und die Kosten des Gewässerschutzes zeitlich unterschiedlich anfallen. Die oben genannten Argumente unterstreichen, daß die NKA auf einen längeren Zeitraum auszurichten ist, was mit der Gleichung (1) ausgedrückt werden soll.

$$\sum_{t=0}^{T} [N(t) - K(t)]D(t) > 0 \qquad \text{(Gl. 1)}$$

N - Nutzen der Maßnahme

K - Opportunitätskosten der Maßnahme

T - Zeithorizont

D - Diskontierungsfaktor

Die Berücksichtigung der Zeitpräferenz erfolgt über den Diskontierungsfaktor D. Im allgemeinen wird davon ausgegangen, daß $D(t) = (1+r)^{-t}$, wobei die Diskontierungsrate $r > 0$ ist. Mit diesem Ansatz wird bekanntlich die Gegenwart höher als die Zukunft bewertet. Über die Höhe der Diskontierungsrate r gibt es allerdings unterschiedliche Auffassungen (PRICE, 1993). Dies ist nicht unwichtig, da die Wahl der Diskontierungsrate einen erheblichen Einfluß auf das Resultat der Nutzen-Kosten-Analyse hat. Die traditionelle, von idealisierten Bedingungen ausgehende ökonomische Theorie besagt, daß die Diskontierungsrate gleich oder größer als die Rate des Wirtschaftswachstums sein sollte. In der praktischen Anwendung ist eine solche Herangehensweise problematisch, da zum Beispiel die ökonomische Wachstumsrate über die Zeit nicht konstant ist. Des weiteren kann ein solcher Ansatz einschließen, daß die Diskontierungsrate höher als die natürliche Regenerationsrate der erneuerbaren Ressourcen ist. In diesem Falle führt das ökonomisch optimale Handeln jedoch zu einer so früh wie möglichen Ressourcenzerstörung (CLARK, 1976). Das ist aus der Sicht einer lebenssichernden Ressource wie dem Wasser absurd und mit Nachhaltigkeit nicht kompatibel. Obwohl eine Reihe entscheidender Fragen ungelöst sind, wird das oben genannte Diskontierungsverfahren den methodischen Empfehlungen von Nutzen-Kosten-Analysen zu Grunde gelegt.

Der sich in der internationalen Diskussion widerspiegelnde Stand *zur Bewertung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen* findet u.a. seinen Niederschlag in den „Grundzügen der Nutzen-Kosten-Untersuchungen" (LAWA, 1981), die von der deutschen Länderarbeitsgemeinschaft Wasser ausgearbeitet wurden. Während eine Reihe methodischer Grundlagen der NKA für Oberflächengewässer entwickelt wurden, trifft dies nicht gleichermaßen für Grundwasser zu. Des weiteren ist nicht ausreichend gelöst, wie Irreversibilitäten und Langzeiteffekte sowie Unsicherheit und Risiko in die Bewertung zu integrieren sind. Zwar sind Fortschritte in den Bewertungstechnologien zu verzeichnen, so daß als ursprünglich intangibel geltende „non-use"-Werte inzwischen quantifiziert werden können. Aber es sind nach wie vor und möglicherweise überhaupt Grenzen der Quantifizierung gegeben. Das trifft insbesondere für die oben genannten Probleme zu. Aus der Sicht des „Nachhaltigkeits-Konzepts" werden bereits bestehende Fragen erneut aufgeworfen, aber es sind auch neue, noch nicht gelöste Probleme hinzugekommen. Das betrifft insbesondere die Frage, wie ist das Nachhaltigkeitsparadigma: „Erhaltung des Naturkapitals"

unter Berücksichtigung von Quantifizierungsproblemen, Unsicherheit und Risiko verifizierbar in das Konzept der Bewertung des Grundwasserschutzes einzubeziehen.

1.4.4 Forschungsdefizite und Lösungsansätze

Im Kontext bestehender Forschungsdefizite in der Bewertung des Grundwasserschutzes sind entsprechende Lösungsansätze in den folgenden Richtungen anzustreben:

Ökologisch-ökonomische Indikatoren und Bewertungsmaßstäbe nachhaltiger Nutzung von Grundwasserressourcen in Abhängigkeit von naturräumlichen Situationen. Die meisten Bewertungsverfahren gehen von einer Quantifizierung von Umwelteffekten in monetärem Ausdruck aus. So gilt die Forderung nach einem konstanten Bestand an Naturkapital bereits als erfüllt, wenn nachgewiesen wird, daß

$$\sum_{i=1}^{m} K_{GW}^{i} \leq \sum_{j=1}^{n} N_{GW}^{j} \qquad \text{(Gl.2)}$$

K^{i}_{GW} - Nettoschadenskosten infolge grundwasserbelastender Projekte i = 1 bis m

N^{j}_{GW} - Nettonutzen der Kompensationsprojekte j = 1 bis n

Folgende der NK-Relation zu Grunde liegende Bedingungen sind jedoch aus der Sicht des o.g. Nachhaltigkeitsparadigma als problematisch anzusehen (HANLEY et al., 1995, S. 166):

- Die angenommene Substituierbarkeit zwischen verschiedenen Kompartimenten des Naturkapitals;
- Die Möglichkeit einer ausreichenden Monetarisierung von Umweltschäden und Umweltnutzen;
- Die mögliche Gleichsetzung z.B. einer physisch geringen Umweltverbesserung in der Gegenwart mit einem großen Umweltverlust in der Zukunft unter den Bedingungen diskontierter Nutzen- und Kostengrößen;
- Die Unsicherheit einer künftigen Finanzierung von Kompensationsprojekten.

Eine Alternative ist ein Bewertungssystem, das eine ökologische und ökonomische Bewertung einschließt. Das System müßte von der Bestimmung ökologisch-önomischer Indikatoren nachhaltiger Grundwassernutzung sowie von Maßstäben, die Sollgrößen zur Qualität und

Quantität der Grundwasserressource darstellen, ausgehen. Zu klären ist jedoch, was heißt „nachhaltige Ressourcennutzung"? Ist das „strong" oder „weak sustainability"-Konzept[1] zu verfolgen und ist „Reversibilität" der Grundwasserressource bereits ein hinreichendes Kriterium für das „strong sustainability"-Konzept?

Aus der generellen Zielsetzung einer nachhaltigen Entwicklung wurden in der deutschen Diskussion verschiedene ökologische Grundregeln abgeleitet (vgl. ENQUETE KOMMISSION, 1994). Sie fußen auf Managementregeln einer nachhaltigen Nutzung von Naturressourcen nach DALY (1990, S. 2f.) und PEARCE et al. (1990, S. 43):

1. Die Abbaurate erneuerbarer Ressourcen soll ihre Regenerationsrate nicht überschreiten.
2. Nicht erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, wie ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren Ressourcen sowie der nicht erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird.
3. Stoffeinträge in die Umwelt sollen sich an der Belastbarkeit der Umweltmedien orientieren, wobei alle Funktionen zu berücksichtigen sind, nicht zuletzt auch die empfindliche, ökologische Regelungsfunktion.

Diese Managementregeln sind jedoch noch ressourcenspezifisch und naturraumbezogen zu untersetzen. Betreffs der operationalisierbaren Umsetzung einer nachhaltigen Wasserwirtschaft wurde im Ergebnis eines internationalen Symposiums im Oktober 1996 in Bonn in einem Memorandum konstatiert:

– „Es gibt insgesamt noch keinen allgemeinen Konsens über ein praktisches Konzept zur Begründung von Zielen und Maßstäben nachhaltiger Entwicklungen in der Wasserwirtschaft" (BMU, 1996, S. 385).

[1] Nach PEARCE et al. (1989) ist der konstante Kapitalstock ein wichtiges Merkmal von Nachhaltigkeit. Während das „strong sustainability"-Konzept vom Erhalt des Naturkapitals ausgeht, sind nach dem „weak sustainability"-Konzept bestimmte Formen des Naturkapitals durch Sachkapital substituierbar.

- „Ziele einer nachhaltigen Wasserwirtschaft sind unter anderem die Aufrechterhaltung und die Verwirklichung eines Schutzes der Oberflächengewässer, der Feuchtgebiete, der Meere und des gesamten Grundwassers" (ebenda).
- „Für die nationale und internationale Diskussion über die Nachhaltigkeit in der Wasserwirtschaft ist es notwendig, langfristige ökologische Ziele zu definieren. Bei den Schritten zur Erreichung der Ziele sind neben den ökologischen ökonomische und soziale Aspekte zu berücksichtigen" (ebenda).
- „Die zu entwickelnden Maßstäbe, mit denen Nachhaltigkeit nachvollziehbar in Teilbereichen der Wasserwirtschaft gemessen oder bewertet werden können, sind: Kriterien wie Reversibilität, Indikatoren wie Saprobienindex, Parameter wie Stoffkonzentration und Regeln wie 'wenn hohes Gefährdungspotential, dann höheres Sicherheitssystem' zu entwickeln. Für die Maßstäbe sind Soll-Größen (wie ... Nullemission im anlagenbezogenen Umgang mit gefährlichen Stoffen oder vollständige Abbaubarkeit von eingebrachten Stoffen) festzulegen..." (BMU, 1996, S. 386).

Zur Zeit ist also noch nicht ausreichend beantwortbar, in welcher Quantität und Güte die Ressource an die künftigen Generationen zu übergeben ist. Dabei sollte ein solches Konzept der Indikatorenbestimmung verfolgt werden, das im Sinne eines Frühwarnsystems Trend- anstatt Zustandsindikatoren zum Ziel hat und zum Beispiel die anthropogen sowie auch geogen bedingten Ursachen irreversibler Veränderungen der Grundwasserressourcen anzeigt (RSU, 1994; PIERI et al., 1995; BUND & MISEREOR, 1996; RENNINGS et al., 1997; u.a.). Der in „Zukunftsfähiges Deutschland" (BUND & MISEREOR, 1996) diskutierte Bewertungsmaßstab für die nachhaltige Nutzung des Grundwassers „Grundwasserentnahme nicht größer als Grundwasserneubildungsrate" ist sicherlich notwendig, aber keinesfalls hinreichend (RSU, 1994; PIERI et al., 1995; EPA, 1995; BUND & MISEREOR, 1996; RENNINGS et al., 1997). Das heißt letztlich, daß hinreichende naturraumbezogene, ökologisch-ökonomisch determinierte Grenzen erst abgesteckt werden müssen, innerhalb derer die Ressourcennutzung erfolgen darf.

Es ist in diesem Zusammenhang zu prüfen, ob das „Pressure-State-Response-Modell" der OECD geeignet ist, Trendindikatoren in ihrem sozio-ökonomischen Kontext abzubilden, und wie dieses Modell für die Bildung von Indikatoren einer nachhaltigen Grundwasserressourcennutzung zu untersetzen ist. Diesbezüglich ist das AQUA-Modell zu

untersuchen (HOEKSTRA, 1996), dem das „Pressure-State-Impact-Response-Modell" zu Grunde liegt. Das AQUA-Modell umfaßt:

- Die Beschreibung sozioökonomischer und umweltbedingter Einflüsse auf das Wassersystem („Pressure"-Modell).
- Die Ermittlung der Quantität und Qualität des Wassers über die Zeit („State"-Modell).
- Die Auswirkungen veränderter Wasserquantität und -qualität auf die sozioökonomischen und ökologischen Funktionen des Wassersystems („Impact to Function"-Modell).
- Die Reaktionen der Gesellschaft zur Veränderung der die Wasserquantität und -qualität beeinflussenden Faktoren („Response"-Modell).

Die „Pressure"-, „State"- und „Impact-Function"-Modelle sind durchaus eine Informationsbasis zur Ableitung von Indikatoren nachhaltiger Ressourcennutzung sowie von Maßstäben, die Sollgrößen zur Qualität und Quantität der Grundwasserressource darstellen. Dabei ist allerdings die Kenntnis der naturraumbezogenen Funktionen der Grundwasserressource entscheidend. Als methodische Grundlage können die von der EPA herausgegebenen Richtlinien für die Bestimmung des ökonomischen Nutzens des Grundwassers dienen (EPA, 1995).

Bestimmung des Wertes für das öffentliche Gut Grundwasser in Abhängigkeit von naturräumlichen Situationen und Landnutzungen. Ein wesentlicher Baustein der ökonomischen Bewertung ist die Bestimmung des ökonomischen Wertes des Grundwassers. Das Problem liegt dabei weniger im theoretischen Ansatz als vielmehr in unzureichenden methodischen Grundlagen (vgl. FREEMANN III, 1994). Inzwischen liegt allerdings eine EPA-Rahmenmethodik vor, die die Ermittlung des ökonomischen Nutzens des Grundwassers zum Gegenstand hat und bezüglich ihrer Anwendbarkeit zu prüfen ist (EPA, 1995). Eine wesentliche Voraussetzung der Wertbestimmung ist dabei die Kenntnis der Beziehungen zwischen Grundwasserschutzmaßnahmen und biophysikalischen Veränderungen der Grundwasserqualität und/oder -quantität. Die Wertbestimmung kann also unmittelbar an die methodischen Grundlagen der ökologischen Bewertung angeknüpft werden. Der Algorithmus der Ermittlung des ökonomischen Wertes geht aus der Abbildung 1.4-1 hervor. Die Wertbestimmung ist nicht nur für die NKA von Bedeutung, sie ist auch in folgender Richtung zu sehen:

„An appropriate pricing is a key tool for water management.... In general, however, water is still an underpriced natural resources. Accurate pricing could make a major contribution to achieving environmentally sound water use“ (OECD, 1992, S. 68).

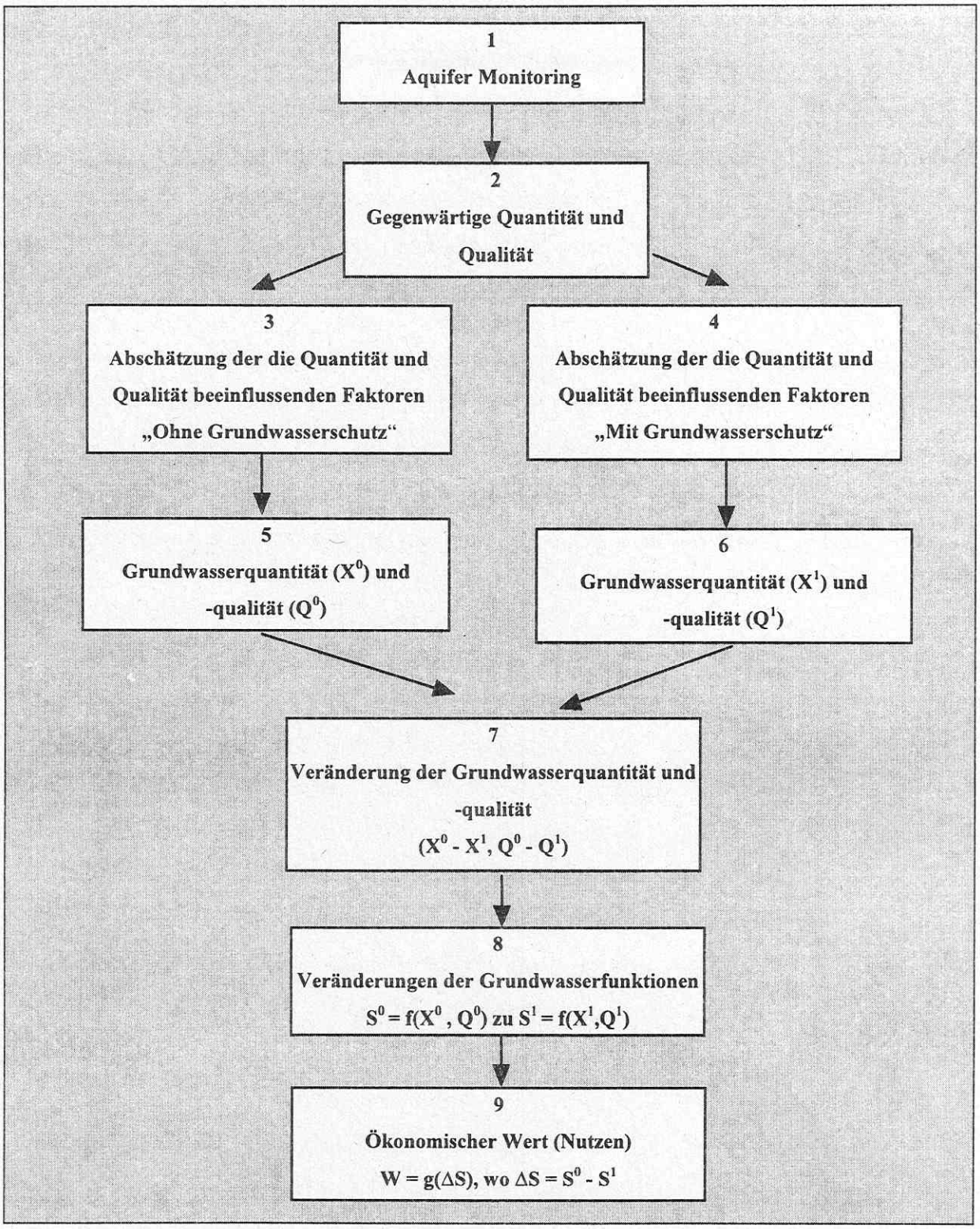


Abb. 1.4-1: Verfahrensschritte zur Bewertung des Grundwasserschutzes (BERGSTRÖM et al., 1996, S. 281).

achieving environmentally sound water use" (OECD, 1992, S. 68). Der Wasserressourcenpreis sollte dabei folgenden Anforderungen entsprechen: „reflecting the ...'polluter pays principle' and concern with long-term sustainable development of the resource" (OECD, 1992, S. 69).

Auf dem bereits erwähnten internationalen Symposium zur Wasserwirtschaft im Herbst 1996 in Bonn wurde ebenfalls die Einbeziehung des Wertes für das öffentliche Gut Wasser in den Trinkwasserpreis als eine zu lösende Aufgabe gestellt. Es ist zu prüfen, „ob der Wert für das Gemeingut Wasser zusätzlich in den Wasserpreis zu integrieren ist" (BMU, 1996, S.386). Diese Diskussion läßt sich zunehmend auch aus internationaler Perspektive beobachten (MUNASINGHE et al.,1995; EPA, 1995; EC, 1996).

Ermittlung von trade-off-Kurven (MUNASINGHE et al., 1995). Dieser Anspruch entspringt der Tatsache, daß die durch Produktion und Konsumtion bedingten ökonomischen Nutzen und Kosten von einer Vielzahl von sich über die Zeit verändernden Faktoren abhängt. Obwohl die Informationen über ihre Entwicklung mit Unsicherheiten behaftet sind, sollten solche die trade-off-Situation beeinflussenden Faktoren bei einem Entscheidungsprozeß berücksichtigt und für diesen entsprechend erhoben und systematisiert erfaßt werden.

Integration von Langzeitkalkülen. Mit den Langzeitkalkülen ist vor allem das Problem der Diskontierung verbunden. Wie bereits dargelegt, gibt es Klärungsbedarf zur Höhe der Diskontierungsrate. Nach GOODIN (1982) sollten unterschiedliche Güter und Sektoren mit unterschiedlichen Diskontierungsraten bewertet werden. Dies steht jedoch in Widerspruch zu den Voraussetzungen eines Marktgleichgewichts. Demzufolge sind im Falle eines Gleichgewichts alle Diskontierungsraten gleich. Des weiteren wären auf Grund sich verändernder Wachstumsraten an und für sich zeitabhängige Diskontierungsraten anzuwenden (AZAR & STERNER, 1996). Diese sind wiederum nicht konsistent mit optimalen Entwicklungspfaden über die Zeit. Ein weiteres Problem besteht darin, daß Nutzen-Kosten-Analysen auf individuelle Präferenzen ausgerichtet sind und das auch aus intertemporaler Sicht. Von besonderem Gewicht ist, daß die intertemporalen Präferenzen der Individuen durch das Sterberisiko bestimmt sind. Die Gesellschaft braucht dieser Erwartung aber nicht zu folgen (PRICE, 1993). Nachhaltigkeit, die die gesellschaftliche Ebene und die menschliche Existenz aus einer Langzeitperspektive betont, erfordert die Anwendung einer sozialen Zeitpräferenzrate. Offen ist allerdings, wie sie zu bestimmen ist.

Ein weiteres Problem bei der Anwendung der Diskontierungsrate ist, wie Unvorhersagbarkeit, Unsicherheit und Risiko zu behandeln sind. Wie bereits DREPPER und MÅNSSON aufzeigten (1993), können ökologiebezogene Unvorhersagbarkeit in Verbindung mit Risikoaversion eine ökonomisch optimale Diskontierungsrate $r < 0$ ergeben. In dem Fall sind jedoch akzeptable Lösungen für die Gegenwart zu finden.

1.4.5 Konzept zur ökologisch-ökonomischen Bewertung des Grundwasserschutzes

Zur Entwicklung eines Verfahrens der ökologisch-ökonomischen Bewertung des Grundwasserschutzes kann an theoretische und methodenorientierte internationale und nationale Arbeiten zur Bewertung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen angeknüpft werden. Das Verfahren ist jedoch auf den zuvor genannten Gebieten weiterzuentwickeln sowie an das Schutzgut Grundwasser und den Torgauer Raum anzupassen. Damit liegt dem Bewertungsansatz ein regionaler Bezug zu Grunde. Die Relevanz des regionalen Ansatzes resultiert einmal daraus, daß für Entscheidungen zum Grundwasserschutz naturraumbezogene Informationen notwendig sind. Zum anderen bestehen diesbezüglich auch Defizite. In diesem Zusammenhang schreibt KLEMMER, „...daß sich die Forschung auf dem Gebiet der Nutzen-Kosten-Analysen von Umweltschutzaktivitäten weniger auf die Schätzung von Globalzahlen, sondern sich eher auf bereichsbezogene Betrachtungsweisen konzentrieren sollte, wobei regionale Untersuchungseinheiten besonders wichtig erscheinen" (KLEMMER, 1992).

Das Bewertungsverfahren gliedert sich in folgende Bewertungsschritte (siehe Abb. 1.4-2):

1. Entwicklung von ökologisch-ökonomischen Indikatoren und Bewertungsmaßstäben nachhaltiger Nutzungen von Grundwasserressourcen und Entscheidungsregeln unter Berücksichtigung von Unsicherheit und Risiko.
2. Kosten- und Nutzensermittlung des Grundwasserschutzes im Kontext ökologisch-ökonomisch determinierter Grenzen.
3. Entscheidungsregeln zur Reduzierung von Konflikten zwischen Grundwasserschutz und konkurrierenden Nutzungen.

1. Bewertungsschritt. Ausgehend von zu präzisierenden Kriterien einer nachhaltigen Nutzung des Grundwassers sind die ökologisch-ökonomischen Indikatoren und Bewertungsmaßstäbe, die sich auf die Bedingungen des Torgauer Raumes beziehen, abzuleiten. Grundlage soll das „Pressure-State-Response-Modell" AQUA sein.

Die Debatte um die Wasserschutzgebiete im Torgauer Raum zeigt aber auch, daß eine Reihe von Unsicherheiten über die Belastungspfade und -folgen zu verzeichnen ist, so daß nicht hinreichend Nachhaltigkeitsindikatoren bestimmt werden können. Das ist mit Sicherheit kein unikates, nur auf den Torgauer Raum bezogenes Problem. Somit sind unter Berücksichtigung der für den Torgauer Raum relevanten und zu definierenden Irreversibilitäten, Risiken und Unsicherheiten generelle *Entscheidungsregeln* (aus naturwissenschaftlicher, ökonomischer und sozialer Sicht) zu entwickeln. Die Entscheidungsregeln sind sachbezogen aber auch akteursorientiert zu erarbeiten (JOUBERT et al., 1997, S. 123f).

2. Bewertungsschritt. Die Ableitung von ökologisch-ökonomischen Indikatoren und Bewertungsmaßstäben für die politische Entscheidungsvorbereitung ersetzt keinesfalls den zweiten Bewertungsschritt, der die Nutzen- und Kostenermittlung des Grundwasserschutzes zum Gegenstand hat. Dieser Bewertungsschritt dient vor allem:

1. dem Nutzen-Kosten-Vergleich von Maßnahmen des Grundwasserschutzes sowie
2. der Ableitung ökonomischer Instrumentarien für die Förderung eines integrierten Ressourcenschutzes. Aus der Sicht eines abiotischen Ressourcenschutzes sind vor allem relevant:
   - der Grundwasserressourcenpreis und
   - die Ausgleichsregelungen und Honorierungen von Leistungen für den abiotischen Ressourcenschutz sowie Abgaben zur Reduzierung von Gewässerbelastungen.

Die bisherige Nutzenerfassung des Grundwasserschutzes ist weitestgehend auf den indirekten Nutzen fokussiert. Dabei dominiert die Ermittlung von Kosteneinsparungen bei der Trink- und Brauchwasserversorgung, die vor allem auf die Reduzierung der verschmutzungsbedingten Beseitigungskosten zurückzuführen sind. Der direkte Nutzen, der aus einer positiven Veränderung der ökologischen und ökonomischen Leistungen der Grundwasserressource resultiert und im ökonomischen Wert des Grundwassers zum Ausdruck kommt, bleibt - wie bereits dargelegt - weitestgehend unberücksichtigt. In diesem Zusammenhang ist der Frage nachzugehen, ob die Grundwasserentnahmegebühren eine Form des ökonomischen Wertes des Grundwassers darstellen und somit Ausdruck des Ressourcenpreises sind. So ist zu prüfen, inwieweit die Entnahmegebühren von 0,03 DM / m³,

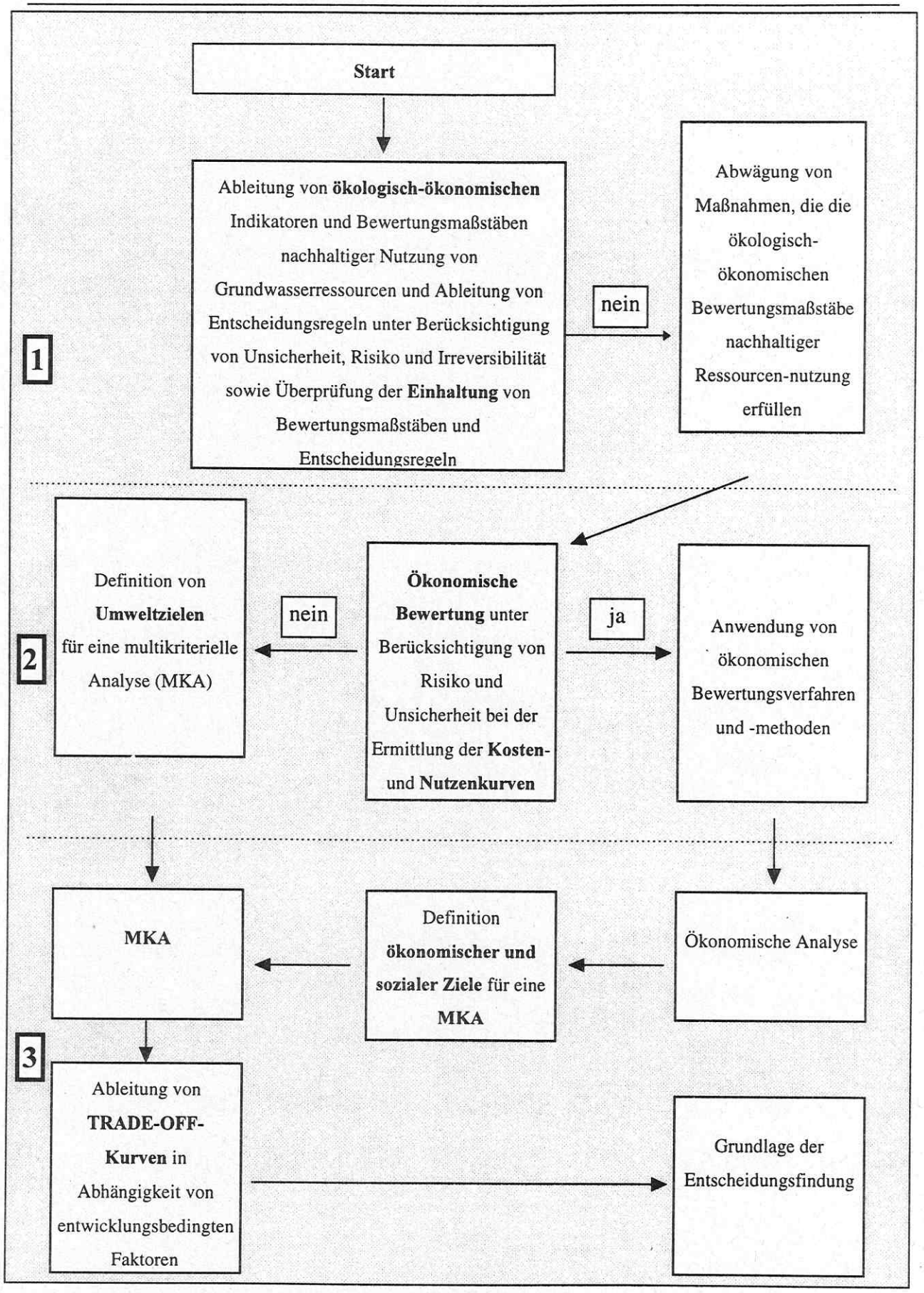


Abb. 1.4-2: Flußbild zur ökologisch-ökonomischen Bewertung des Grundwasserschutzes

entsprechend der sächsischen Regelung (SWG, 1993, S. 228), einen Ressourcenpreis repräsentieren und worin ihre Grenzen als Quelle für die Honorierung von Leistungen für den Gewässerschutz bestehen.

Kostenseitig sind

- die aus dem Produktionsverzicht resultierenden Gewässerschutzkosten,
- der Faktoraufwand für den Gewässerschutz und
- die Planungs- und Überwachungskosten

zu ermitteln.

Ein die Kosten-Erfassung tangierender Diskussionsgegenstand ist: In welcher Größenordnung fallen Kosten des Gewässerschutzes an und in welcher Höhe sind Honorierungen ökonomisch gerechtfertigt? Entsprechend dem Verursacherprinzip wären beispielsweise die Leistungen des Landwirtes für den Grundwasserschutz zu honorieren. Voraussetzung ist ein kausaler Zusammenhang zwischen Landnutzungsänderung und Grundwasserschutz wie beispielsweise ihr Einfluß auf die Grundwasserneubildung und Grundwasserqualität (HERZOG et al., 1997, S. 143f). Der Nachweis solcher Leistungen von Landwirten für den Grundwasserschutz und die Erfassung der ihnen zu Grunde liegenden Kosten (Opportunitätskosten) ist eine wesentliche Basis für die Begründung entsprechender Honorierungen, die nach dem Gemeinlastprinzip oder nach dem Nutznießerprinzip finanziell geregelt werden können (O'HARA, 1984; MEIß, 1996).

In diesem Zusammenhang ist allerdings zu klären, ob die Ausgleichszahlungen, wie sie zum Beispiel mit der „Verordnung des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung über Schutzbestimmungen und Ausgleichsleistungen für erhöhte Aufwendungen der Land- und Forstwirtschaft in Wasserschutzgebieten vom 30. Juni 1994" (SächsSchAVO, 1994, S. 1178f) geregelt sind, volkswirtschaftliche Kosten widerspiegeln. Dies ist mit Sicherheit aus folgenden Gründen zu verneinen:

- Es wird letztlich ein Ausgleich für das „Unterlassen von Verunreinigungen" gezahlt. (Berechnungsgrundlage für den Ausgleich der wirtschaftlichen Nachteile von Land- und Forstwirten in Wasserschutzgebieten soll zwar die „ordnungsgemäße land- und forstwirtschaftliche Nutzung" sein, aber dieser Begriff ist interpretierbar)
- Die Ausgleichspauschale ist nicht an die Bodenverhältnisse und den Grundwasserleiter angepaßt.
- Der Gewässerschutz zahlt die Agrarprotektion mit (HAMPICKE, 1992).

Das heißt, diese Ausgleichsregelung ist aus der Sicht des Verursacherprinzips als problematisch anzusehen. Des weiteren dürfte eine Überbewertung der wasserschutzbedingten Nutzenseinbußen vorliegen. Insgesamt ist zu konstatieren, daß die methodischen Grundlagen der Nutzen- und Kostenermittlung des Grundwasserschutzes noch zu vervollkommnen sind.

3. Bewertungsschritt: Dieser Bewertungsschritt zielt auf Entscheidungsregeln zur Reduzierung von Konflikten zwischen Grundwasserschutz und konkurrierenden Nutzungen, um vor allem eine nachhaltige Wirtschaftsweise der Verursacherbereiche zu unterstützen. Die eindimensionale, ökonomische Bewertung soll ergänzt werden durch eine multikriterielle Analyse. Sie dient dem Ziel, trade-off-Kurven zu ermitteln und damit Handlungsspielräume für die Reduzierung des Nutzungskonfliktes aufzuzeigen (MUNASINGHE et al., 1995; HANLEY et al., 1995). Zunächst ist ein zweidimensionaler, auf ökologische und ökonomische Ziele ausgerichteter Bewertungsansatz beabsichtigt. Faktoren, die eine Reduzierung der trade-off zwischen Gewässerschutz und Wirtschaft erwarten lassen, sind zu identifizieren. Trade-off beeinflussende Faktoren wie Konsumentenpräferenz für die Umwelt, technische Entwicklungen, Arbeitsproduktivitätsentwicklung, Entwicklung von Weltmarktpreisen, Umweltimage, Ressourcenknappheit sind zu ermitteln, zu typisieren und bezüglich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit zu bestimmen.

Mit diesen Schritten wurde ein Bewertungsansatz vorgestellt, der von der Ableitung ökologisch und ökonomisch determinierter Grenzen ökonomischen Handelns in Wasserschutzgebieten ausgeht, die Nutzen- und Kostenerfassung in diesen Grenzen zum Gegenstand hat und die künftigen Handlungsspielräume zur Reduzierung von trade off aufzeigen soll.

2 Raumbezogene Bewertungsmöglichkeiten auf der Grundlage von Fuzzy Sets

2.1 Einführung und Problemstellung

Wilfried Wolf

Raumplanerische Objekte und Zielstellungen sind oft nicht allein durch eine begrenzte Objektivierbarkeit bestimmt und von daher in ihrer Definition nur unscharf zu fassen, sondern darüber hinaus in komplexe und mehrdimensionale Struktur- und Bedingungsgefüge eingebettet. Handelt es sich zudem um ein intensiv genutztes Raumgefüge mit vielfältigen Wechselbeziehungen und konkurrierenden Nutzungsansprüchen sind die zu bewertenden Problem- und Zielstellungen meist gering oder schlecht strukturierbar, und eine adäquate Datenbasis ist die Ausnahme. Infolgedessen lassen sich die Planungsziele zwar begrifflich zutreffend aber nicht unbedingt eindeutig formulieren und modellieren.

Die Gründe sind kognitiver Art, da die Rationalität menschlichen Entscheidungsverhaltens bei der Erfassung und Bewertung komplexer Strukturen sich bald Grenzen nähert, die eine Problemvereinfachung erzwingen. Dies wirkt nicht zuletzt als subjektive Präferenzierung im gesamtem Prozeß der Bewertung von Kriterien, Zielen und Alternativen in den Planungsmodellen.

Verkürzt gesagt, soll „exakte" Planung mit zum Großteil unscharfen Phänomenen, Begriffen, Bewertungen, Zielen, Daten etc. realisiert werden. Trotz dieser im allgemeinen unstrittigen Problemlage wird die Thematik der „Unschärfe, Vagheit und Unbestimmtheit" in raumplanerischen Daten und Modellansätzen im nationalen Rahmen wissenschaftlich bisher nahezu ignoriert, ganz im Gegensatz zum angelsächsischen Sprachraum, zum asiatischen Bereich (Japan, China) wie auch mit zunehmender Tendenz in Österreich. Aus der Logik der Sachlage heraus wäre gerade eine verstärkte Diskussion mit dem „Unschärfephänomen" die zu erwartende Reaktion. Statt dessen wird hiermit weiterhin höchst intuitiv in den verschiedensten Anwendungsdisziplinen mit raumplanerischer Relevanz umgegangen. Die Ursachen dürften vor allem im subjektiven Bereich, insbesondere in der noch außerordentlich zögerlichen Auseinandersetzung mit den Grundlagen der Theorie der Unschärfe (Fuzzy-

Theorie) sowie im Beharrungsvermögen tradierter Herangehensweisen in Theorie und Praxis einer Raumplanung im weitesten Sinne liegen.

Die traditionelle Modellierung, die mit dem klassischen mathematischen Instrumentarium erfolgt, erzwingt Idealisierungen, um von dem konkreten Problem zu einem angepaßten mathematischen Modell zu kommen. Diese Idealisierungen fußen auf Annahmen, über genaue Daten oder Daten mit genau bestimmbaren Fehlergrenzen verfügen zu können bzw. verbindliche Festlegungen hinsichtlich des Verständnisses der benutzten Begriffe zu haben. Beide Prämissen sind bei raumplanerischen Vorhaben, wenn überhaupt, nur in Ausnahmefällen zu denken.

Die Verarbeitung unbestimmter, unscharfer oder vager Informationen in Form von unscharfen Relationen, Begriffen sowie Datenunschärfe, die durch Unvollständigkeit, Meß- oder Erhebungsfehler bestimmt ist, kennzeichnet die Ausgangsbedingungen im raumplanerischen Bereich und stellt ein relevantes, allerdings nur partiell und graduell behebbares Problem dar. Für das Spektrum der möglichen Modellansätze, die diese Spezifik zu berücksichtigen haben, ist die jeweils vorliegende konkrete Informationssituation ausschlaggebend (vgl. hierzu PEIßKER 1992a, S.8).

In Abhängigkeit von der Bereitstellung der Daten

- vollständig im Sinne von ausreichend zur eindeutigen Charakterisierung der Ausgangs-
- und Zielgrößen,
- exakte Angaben mit bekannten Fehlergrenzen,
- Verteilungen auf der Basis wahrscheinlichkeitstheoretischer Ansätze,
- unvollständig, unaktuell, interpoliert oder geschätzt,
- mit eingeschränktem Gültigkeitsbereich,
- unscharf im Sinne von qualitativ, linguistisch definiert

ist ein differenziertes methodisches Instrumentarium einzusetzen.

In Lösungsansätzen der mathematisch-analytischen Modellierung, insbesondere in SDS-Systemen, sind exakte Daten und normative Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Abschätzung von sogenannten Risikosituationen dominierend. Im Falle unvollständiger Informationen wird vorzugsweise das ***Bayes***-Theorem zur Ermittlung und/ oder Verbesserung

von (apriori) Wahrscheinlichkeitsannahmen resp. -aussagen eingesetzt. Beide Vorgehensweisen fußen letztlich auf statistischen Modellen zufallsverteilter Größen.

Die Nützlichkeit der klassischen mathematischen Methoden für Zwecke der Modellierung steht außer Frage. Allerdings besteht die Gefahr falsche bzw. untaugliche Ergebnisse zu erzielen, wenn keine exakten Angaben zu den Modellparametern zur Verfügung stehen. Diese Situation besteht nach MAYER et al. (1993, S.5) insbesondere dann, wenn folgende Probleme auftreten:

- „Reale Situationen sind oft nicht eindeutig und klar abgrenzbar und können nicht präzise beschrieben werden."
- „Die umfassende Beschreibung eines realen Systems erfordert mehr detaillierte Daten als ein Mensch gleichzeitig erkennen, verarbeiten und verstehen kann."

Viele Systeme in Natur und Gesellschaft weisen diese Merkmale auf und widersetzen sich auf Grund ihrer Komplexität dem Bemühen, sie wissenschaftlich präzise in ihrem Verhalten zu beschreiben.

Handelt es sich hierbei um Unschärfe oder Vagheit in der Zugehörigkeit von Daten bzw. Sachverhalten zu vorgegebenen Kategorien, um unscharfen Vorgaben, subjektiven Angaben und qualitativen Eigenschaften, kurz gesagt, um Unbestimmtheit/ Unschärfe nichtstochastischer Art, bietet die von ZADEH (1965) entwickelte Theorie der unscharfen Mengen (Fuzzy-Theorie) ein geeignetes methodisches Werkzeug zu deren Formalisierung und Problemlösung.

Besondere Vorteile bietet die Fuzzy-Theorie nach PEISSKER (1992a, S.5,17,41) wenn:

- mathematische Modelle nicht aufstellbar oder zu kompliziert sind,
- starke Nichtlinearitäten eine Formalisierung außerordentlich erschweren,
- zwischen den Einflußgrößen starke Wechselbeziehungen bestehen,
- die Meß-/Beobachtungswerte nur eine indirekte Beschreibung der realen Zustands-/ Prozeßgrößen erlauben

bzw. als effiziente Beschreibungsmethode für vage Konzepte und Systemmodelle, wenn Unschärfen:

- in der Struktur des zu modellierenden Systems,
- in den Systemparametern,
- im Prozeßverhalten bestehen.

Im Bereich der Wissensdarstellung werden sogenannte linguistische Variable in der Fuzzy-Theorie verwendet, um Systeme mittels Aussagen zur Effektivität, Zuverlässigkeit, Belastbarkeit, Stabilität u.a.m. durch Begriffe der Umgangssprache qualitativ zu beschreiben. Schließlich gewinnt die Fuzzy-Theorie in formalen Systemen der Klassifizierung von Objekten mit Unschärfeeigenschaften, fließenden Übergängen, ambivalenter Zugehörigkeit u.a.m. zunehmend an Bedeutung.

Bei allem folgt die Grundidee der Fuzzy-Theorie der Vorstellung, eine dem Kontext angemessene Unschärfe, Vagheit, Unsicherheit mittels einer adäquaten graduellen Differenzierung quantitativ durch eine Menge von reellen Zahlen auszudrücken und damit operationabel zu machen.

So gesehen bildet die Fuzzy-Theorie eine methodische Brücke, um evidenzmäßige Unschärfe und sprachliche Vagheit, die in der Bewertung und Abgrenzung von Klassen, Kategorien, Eigenschaften, Bewertungen, Zielvorgaben etc. zu Tage treten, zu modellieren und algorithmisch umzusetzen. Ihr großes methodisches Potential kommt insbesondere dort zur Geltung, wo für Bewertungen oder Entscheidungsprozesse keine eindeutigen Informationen, Maßstäbe oder Algorithmen für die Verarbeitung der Eingabedaten resp. Formulierung der Zielstellungen und Mittel vorliegen. Anstelle des „exakten" mathematischen Methodenapparats gewinnt notwendigerweise die Subjektivität in Form des Expertenwissens bei der Problemlösung eine Schlüsselstellung. Der gesunde Menschenverstand wird aufgewertet. Inhaltsberücksichtigendes Wissen wird formalisierbar und kann auf die Sprachebene des Computers abgebildet werden.

Das Konzept der Fuzzy-Theorie ist aus dieser Perspektive eine Absage an das noch vorherrschende Paradigma, objektiv vorhandene graduelle Übergänge, wie sie typischerweise auch in einer Vielzahl geographischer Phänomene auftreten, analytisch-methodisch bzw. durch entsprechende Theoriekonzepte zu eliminieren. Unschärfe, Unsicherheit oder Vagheit, die bisher eher als störend bei der Erfassung, Bewertung, Kategorisierung, Modellbildung etc.

galten, wurden deshalb möglichst frühzeitig aus dem gesamten Bearbeitungsprozeß durch Kategorisierung, Anwendung von mehr oder weniger objektivierbaren Ausschlußkriterien, mathematischen und logischen Theoremen u. ä. entfernt. Man befand sich wieder im bekannten System der zweiwertigen (Boolschen) Logik. Wenig Beachtung fand dabei die Tatsache, daß damit zugleich eine entscheidende Qualität der betrachteten Dinge verloren ging.

Im Gegensatz dazu ist das gesamte mathematische und logische Kalkül der Fuzzy-Theorie darauf ausgerichtet, Unschärfe der oben genannten Arten in allen Operationschritten einer Problemlösung zu erhalten, zu verarbeiten bzw. zu verdichten und der schlußendlichen Beurteilung des Fachmanns in seiner Entscheidungsfindung anheim zu stellen. Das freilich erfordert eine völlig andersartige, weil ungewohnte Betrachtung von Zusammenhängen, Modellierungsformen und Herangehensweisen an Entscheidungsfindungen, wie sie bis dato in Theorie und Praxis unseres Kulturkreises vorherrschen. Hier liegt offensichtlich ein weiterer wesentlicher Grund für die bisher geringe Verbreitung und Akzeptanz ihres innovativen theoretischen und methodischen Potentials.

2.2 Allgemeine Bemerkungen zur Fuzzy Methodik und mögliche Einsatzbereiche

Wilfried Wolf

Die Grundidee der Fuzzy-Theorie beruht auf dem Umstand, daß alle realen Systeme Abstufungen zulassen, wie z.B.:

- die Weiße Elster ist ***stark belastet,***
- die City von Berlin hat eine ***hohe*** kulturelle Attraktivität,
- Potsdam liegt ***ganz nah*** bei Berlin,
- die Schädigung des Baumbestandes beträgt ***ungefähr 50 %,***
- modernisieren unter Einhaltung ***sozialverträglicher*** Kosten.

Ohne in Detailerörterungen zu gehen, wird schon bei einer ersten Annäherung an eine „präzise" inhaltliche Fassung der oben genannten, sehr einfachen Aussagen deren Kontextabhängigkeit bzw. informationelle Unsicherheit deutlich (siehe hierzu auch ZIMMERMANN et al. 1993, S.5 ff).

Zentrales Verständnismoment der Fuzzy-Theorie sind die sogenannten Fuzzy-Sets oder unscharfen Mengen. Im Gegensatz zur konventionellen zweiwertigen Boolschen Logik wird die ***partielle Zugehörigkeit*** eines Elements zu einer Menge (Kategorie, Klasse) mit Werten zwischen Null (keine Zugehörigkeit) und Eins (volle Zugehörigkeit) bewertet, bzw. es lassen sich Phänomene mit fließenden Übergängen zwischen Zuständen wie "sicheres Wissen; kein Wissen", "volle Übereinstimmung; keine Übereinstimmung", "volle Repräsentanz einer Bewertung bezüglich eines Zustands/Ziels; keine Repräsentanz" usw. mittels eines Kontinuums von Mitgliedschaftsgraden resp. Möglichkeitszuständen ausdrücken.

Def.1: Sei X eine Menge von Objekten, die auf Grund einer unscharfen Aussage zu bewerten sind, dann heißt $A=\{(\mu_A(x), x) , x \in X)\}$ unscharfe Menge A auf der Menge der Objekte X. Die Mitgliedschaftsfunktion (membership function) $\mu_A: X \rightarrow [0, 1]$, die jedem Element x aus X eine Zahl $\mu_A(x)$ im Intervall [0,1] zuordnet, repräsentiert den Grad der Mitgliedschaft von x in A, das heißt eine Fuzzy-Menge kann als Menge geordneter Paare $\mu_A(x)/x$ betrachtet werden. Besteht die Mitgliedschaftsfunktion aus der zweielementigen Menge {0,1}, dann ist

A der Grenzfall, also eine gewöhnliche Menge und kann als Sonderfall der unscharfen Menge gelten.

Hierzu sei angemerkt, daß Fuzzy-Mengen Informationen nur näherungsweise darstellen. Sie tragen zudem einen stark subjektiven Charakter, und es gibt keine allgemein verbindlichen Regeln, nach denen Objekten auf Grundlage einer unscharfen Aussage bestimmte Mitgliedschaftsfunktionen resp. diskrete Zugehörigkeitsgrade zuzuordnen sind. Jedoch ist diese Darstellungsform von Unschärfe verbunden mit dem Näherungscharakter der zu gewinnenden Aussagen das grundlegende Element in der gesamten Fuzzy-Theorie.

Von besonderer Wichtigkeit für das Verständnis dieses theoretischen Ansatzes ist der Umstand, daß die Objektmenge X außerordentlich unterschiedlich gedacht werden kann, wobei die Mitgliedschaftsfunktion in Abhängigkeit vom inhaltlichen Kontext auch als Zugehörigkeits-, Möglichkeits- oder Kompatibilitätsfunktion zu interpretieren ist.

Zum Beispiel kann ein Wert $\mu_A(x)$ betrachtet werden als :

- Zugehörigkeitsgrad zu einer Klasse/Kategorie (bei nicht vorhandenen scharf definierten Kriterien (ZADEH 1965)),
- Wahrheitswert (in der mehrwertigen Logik (ZADEH 1965)),
- Kompatibilitätsgrad von x mit einem Konzept A (ZADEH 1978),
- Grad der Leichtigkeit, mit welcher x unter der Bedingung A eintreten kann (ZADEH 1978),
- Grad, mit der eine "elastische Beschränkung" A durch x erfüllt wird (ZADEH 1978),
- Präferenzgrad, mit der eine Aktion oder Alternative von einem Individuum A bewertet wird (XIANG et al. 1992),
- Grad der anzunehmenden Häufigkeit des Auftretens von kleineren Gebieten des Typs A innerhalb eines größeren Typs B (SYRBE 1993),
- Kompatibilitätsgrad, mit welchem eine Rasterzelle x in einem GIS ein Kriterium A erfüllt (WOLF 1996)

Die äußere Nähe von Fuzzy-Sets und Wahrscheinlichkeitsgraden gab Anlaß zu Mißverständnissen der Art, daß die Kritiker glaubten, daß Fuzzy-Sets die Wahrscheinlichkeiten ersetzen sollen. Es hat viele Jahre gedauert, bis allgemein klar war, daß Wahrscheinlichkeiten sich auf Unsicherheiten aus zufälligen Ereignissen, dagegen Fuzzy-Sets sich im allgemeinen auf sprachliche Vagheit oder evidenzmäßige Unsicherheit beziehen.

Während Wahrscheinlichkeit den Mangel an Kenntnis (Information) voraussetzt und das Eintreffen eines Ereignisses "in der Zukunft" statistisch abschätzt (wir sprechen hier z. B. von einem Erwartungswert), kann die Zugehörigkeit (grade of membership or possibility) als Eigenschaft einer Sache, Elements, Objekts begriffen werden, die auch bei vollständiger Information erhalten bleibt, z.B. die unscharfe Aussage "belastetes" Gewässer. Auch bei vollständiger Kenntnis der Belastungsgrößen bleibt die Unschärfe des Begriffs "belastet" erhalten und kontextabhängig im Hinblick auf den Nutzungszweck!

Mittels der Fuzzy-Sets kann der Experte den Grad der Zugehörigkeit, auch Wahrheitsgehalt, auch Leichtigkeit (easiness), mit welchem der Zustand des Gewässers mit der Fuzzy-Menge bzw. unscharfen Aussage "belastetes" Gewässer kompatibel ist, bzw. verbunden werden kann, in einem Wertekontinuum, üblicherweise zwischen 0 und 1 festlegen, wobei insbesondere auch Hintergrundwissen, was nicht meßbar oder nicht gemessen ist, einfließen kann.

Bis Mitte der 70er Jahre wurde diese Art der Unbestimmtheit mehr oder weniger verdrängt und im Methodenspektrum nicht aufgenommen. Insbesondere die Entwicklung wissensbasierter Systeme hat das Bewußtsein für diese unterschiedlichen Arten von Unbestimmtheit, Unsicherheit geschärft.

Gerade die Defizite dieser Systeme bei der Verarbeitung informationeller und kontextabhängiger Unbestimmtheit mit dem klassischen auf zweiwertiger Logik basierendem Schließen haben die Notwendigkeit der Modellierung allgemeiner menschlicher Denk- und Entscheidungsprozesse unter Zuhilfenahme der Fuzzy-Theorie resp. Fuzzy-Logik außerordentlich befördert.

Trotz des weit entwickelten mathematischen und logischen Kalküls dieser Theorie ist sie in ihrem Wesen, wie ZADEH betont, nichtstatistischer Natur.

Nachdem die Fuzzy-Theorie zuerst vor allem in den ingenieurtechnischen Bereichen, im Management und in der Informationsverarbeitung Eingang fand und hier außerordentlich innovativ deren Entwicklung beeinflußte, gibt es eine zunehmende Akzeptanz in den Bereichen der Ökonomie, Natur und Geisteswissenschaften, in der Stadt- und Regionalplanung, in der Geoökologie u.a.m..

Ausdruck dieser Entwicklung sind aus fachspezifischer Sicht vor allem zahlreiche Publikationen in der internationalen Fachliteratur zu solchen Themen wie:

- Satellitenbildverarbeitung und Mustererkennung in der Fernerkundung (BLONDA et al. 1991; SCHMIDT 1996),
- Standortauswahl und Eignungsbewertungen (BANAI-KASHANI 1990; BURROUGH et al. 1992, SUI 1992; HALL et al. 1992; DAVIDSON et al. 1994; REINBERG & BRÖTHALER 1997),
- Management natürlicher Ressourcen (DAVIS & KELLER1997),
- Nutzwertanalyse (MANDL 1994),
- Datenbanken, Datenbankrecherche (ROBINSON 1988, WANG 1994),
- Expertensysteme (JOHNSTON et al. 1987, YAN et al. 1991, LEUNG & LEUNG 1993)
- Regionalisierungskonzepte, räumliche Topologie und Klassifikation (PONSARD et al. 1985; KENT et al.1988, LEUNG 1988, HALL et al. 1992, ALTMANN 1994, BJORKE 1995, SCHMIDT 1996),
- Hydrologie (ESOGBUE et al. 1982),
- Ausbreitung und Gefahrenabschätzung von Naturereignissen (JACCARD 1990).

In der obigen sehr knapp und nur beispielhaft vorgestellten Auswahl an Beiträgen sind jedoch zwei wesentliche Entwicklungslinien vertreten. Zum einen handelt es sich um Arbeiten, in denen die Theorieentwicklung in Bezug auf die Erfassung und Verarbeitung *räumlicher* Unschärfe im Zentrum steht. Hier sind vor allem die richtungsweisenden und theoriebegründenden Arbeiten von LEUNG zu nennen aber auch BOURROUGH, ALTMANN, BJORKE sind Vertreter dieser Richtung. Zum anderen handelt es sich um Beiträge, in denen vorzugsweise die problemspezische Eignung wie auch der praktische und disziplinäre Gewinn fuzzymethodischer Ansätze in bekannten resp. traditionellen quantitativen Methoden und Verfahren vorgestellt werden. Typisch ist hier die Fuzzifizierung von zumeist ausgewählten Eingangsgrößen (Variable) bzw. Modellkomponenten und deren Einbeziehung in die vorgegebenen Lösungsalgorithmen (z.B. Lineare Optimierung [NEGOITA ET AL. 1976; HAMACHER et al. 1978], Clusteranalyse [ONISHI & KAWAGUCHI 1995], Regressionsanalyse [KACPRZYK & FREDRIZZI 1992]).

Aber auch diese Arbeiten enthalten viele originäre theoretische Ansätze, so daß der Übergang zuweilen fließend ist. Diesem als algorithmisch zu bezeichnenden Ansatz steht der wissensbasierte Ansatz gegenüber. Seine besondere Eignung liegt vor allem in der

Bearbeitung schlecht strukturierbarer Entscheidungsprobleme mit unscharfen Entscheidungskriterien und Zielsetzungen durch ein System von Fakten und Regeln, die verbales Wissen repräsentieren und heuristisch abbilden (vgl. REINBERG & BRÖTHALER 1997). Die relative Eigenständigkeit dieser Fuzzy-Systeme, die sich des methodischen Kalküls der Fuzzy-Logik bedienen, hat unter anderem zur Entwicklung von fuzzybasierten Experten-Shells (KOLLIAS & VOLIOTIS 1992; LEUNG & LEUNG 1993) geführt.

Beide Ansätze sollten auch in Kombination innerhalb eines Verfahrens, wie z.B. der Nutzwertanalyse (MANDL 1994) einsetzbar sein.

Betrachtet man die Möglichkeiten und potentiellen Einsatzbereiche der wohl wesentlichsten Komponenten der Fuzzy-Theorie in Regionalisierungs- und Bewertungsverfahren, so bietet die folgende Zusammenstellung (Abb. 2.2-1) hierfür einen guten Überblick.

Abb. 2.2-1: Möglichkeiten der Integration von Fuzzy-Komponenten in Bewertungsverfahren

Einsatzbereiche	Verwendbare Fuzzy- Komponenten
Datenrepräsentation	Unscharfe Mengen Zugehörigkeitsfunktionen Linguistische Variablen
Datenkombination Datenaggregation	Operatoren
Wissensrepräsentation und Entscheidungsfindung	Regeln, Inferenz Linguistische Variablen
Wissensbeschaffung	Fuzzy-Expertensysteme
Modellbildung	alle Komponenten

[2]

Es wird vorgeschlagen, im Bereich der Datenrepräsentation und der Datenkombination/ Datenaggregation die Fuzzy-Zahlen resp. deren Alphaschnitte auf Grund ihrer spezifischen mathematischen Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten ergänzend aufzunehmen Das in Kapitel 3.2. vorgestellte eigene Anwendungsbeispiel möge diesen Gedanken belegen.

[2]Quelle: Reinberg, S. & J. Bröthaler 1997

2.3 Mathematische Grundlagen

Wilfried Wolf

Da Fuzzy-Zahlen eine zentrale Kategorie in der Konzeption von Fuzzy-Sets bilden und deren Einsatz insbesondere in Entscheidungsmodellen bzw. im algorithmischen Ansatz zum Tragen kommt, sollen nachfolgend einige Definitionsansätze vorgestellt werden:

Def. 2: Eine Fuzzy-Zahl ist eine normalisierte, konvexe Fuzzy-Menge über dem reellen Raum. (LEUNG1988).

Dazu gibt es gering unterschiedliche Modifikationen bzw. weitere Definitionen.

(1) $\mu_A(x) = 1$ für genau ein $x \in IR$

(= 1 für mindestens ein $x \in IR$; (ALTMANN 1994))

(2) $\mu_{A(x)}$ ist stückweise stetig (BÖHME 1993)

(3) $\mu_A(x)$ ist normalisiert , das heißt = 1 für mindestens ein $x \in IR$

$\mu_A(x)$ ist konvex (vgl. Def. 2a)

alle schwachen α-Schnitte $A_\alpha = \{x \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$ $(0<\alpha\leq 1)$ sind geschlossene Intervalle (TERANO et al. 1992)

(4) Fuzzy-Intervall (engl.:" 'fuzzy interval' oder 'flat fuzzy number')

wenn zwei Bedingungen erfüllt sind: (PEIßKER 1992b)

zwei reelle Zahlen m_1 und m_2 existieren mit $m_1 < m_2$, so daß

- $\mu_M(x) = 1$ für alle $x \in [m_1, m_2]$
- $\mu_M(x)$ ist stückweise stetig

(5) diskrete Fuzzy-Zahl

Eine unscharfe Menge B auf einer abzählbaren Grundmenge X mit $X \subset R$ heißt diskrete Fuzzy-Zahl, wenn eine unscharfe Zahl A auf R so existiert, daß gilt:

$\mu_B(x) = \mu_A(x) \quad \forall x \in X$

Def. 2a: A ist eine konvexe Fuzzy-Menge, wenn

$$\mu_A(\lambda * x_1 + (1-\lambda) * x_2) \geq \min [\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)], \qquad \forall \lambda \in [0,1].$$

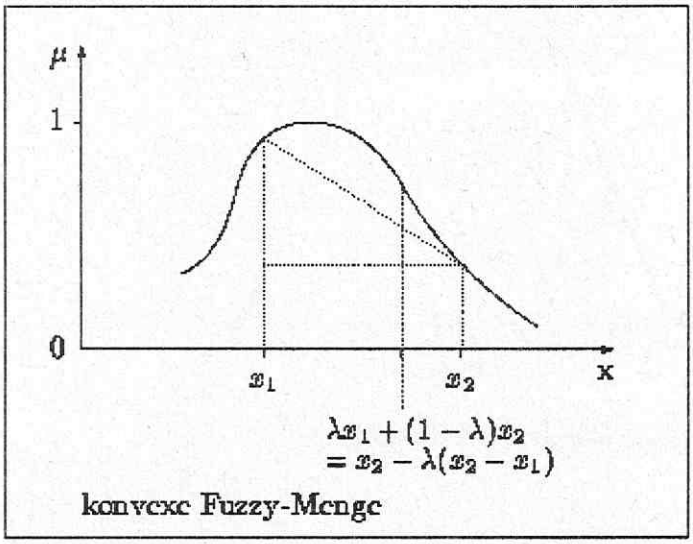


Abb. 2.3-1: Konvexe Fuzzy-Menge

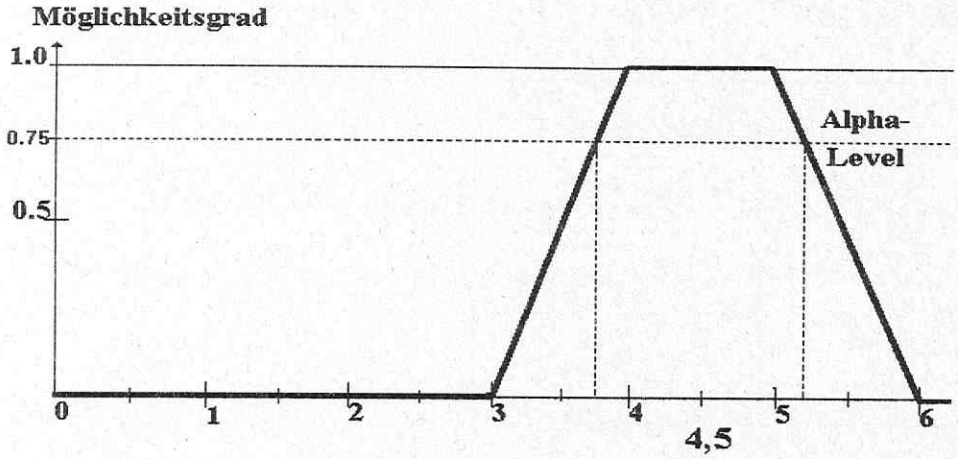
Die so definierte Konvexität bedeutet, daß die Linearkombination zweier Punkte der Zugehörigkeitsfunktion immer einen weiteren Punkt ergibt, dessen $\mu_A(x) \geq$ des kleineren der beiden $\mu_A(x)$ - Ausgangswerte ist. Die Eigenschaft eine konvexe, unscharfe Menge zu sein bedeutet nicht zwangsläufig, daß die Zugehörigkeitsfunktion $\mu_A(x)$ eine konvexe Funktion sein muß.

Das Konzept einer Fuzzy-Zahl umfaßt leicht abweichende Definitionen, wobei in neueren Publikationen (KAHLERT & FRANK 1993) meist das Konzept von TERANO (vgl. Def. 2 (3)), als das umfassendere, Anwendung findet. Das eigene Anwendungsbeispiel stützt sich ebenfalls auf diesen Ansatz.

Will man Fuzzy-Sets bzw. Fuzzy-Zahlen in klassischen Funktionen verwenden, sind einige grundsätzlichen Kenntnisse zur Arithmetik mit Fuzzy-Zahlen nötig. Dabei sind vor allem das "Zerlegungsprinzip (engl.: decomposition principle)" und das "Erweiterungs-Prinzip (engl.: extension principle)" von elementarer Bedeutung.

Das erste Theorem erklärt den Übergang von gewöhnlichen Mengen zu Fuzzy-Mengen und umgekehrt; das zweite die Ausdehnung von Operationen mit gewöhnlichen Mengen auf Fuzzy-Mengen.

Beispiel einer Fuzzy-Zahl:



Mögliche Zugehörigkeitsfunktion zur Fuzzy Zahl 'ungefähr 4,5'

Abb. 2.3-2: Mögliche Zugehörigkeitsfunktion zur Fuzzy-Zahl 'ungefähr 4,5'

Das Zerlegungsprinzip

Def. 3: Eine Gerade parallel zur x-Achse, die die Mitgliedschaftsfunktion in zwei Teile zerlegt, heißt α-Schnitt (LEUNG 1988).

Es sei A eine Fuzzy-Menge über der Grundmenge X. Die α-Schnittmenge

$$A_\alpha = \{ x \mid \mu_A(x) \geq \alpha \}, \ \alpha \in [0,1]$$

ist dann eine klassische Menge, definiert durch die charakteristische Funktion

$$f_{A\alpha}(x) = \mu_{A\alpha}(x) = \begin{cases} 1, \text{ wenn } \mu_A(x) \geq \alpha \\ 0, \text{ wenn } \mu_A(x) < \alpha \end{cases}$$

Das Produkt $\alpha * \mu_{A\alpha}$ ist dann die Mitgliedschaftsfunktion der Fuzzy-Menge $\alpha * A_\alpha$.

$$\mu_{\alpha * A\alpha}(x) = \alpha * \mu_{A\alpha}(x).$$

Die Vereinigung aller Fuzzy-Mengen α^*A_α ergibt die Fuzzy-Menge A

$$A = \cup\ \alpha^*A_\alpha\ ,\quad \alpha \in [0,1]$$

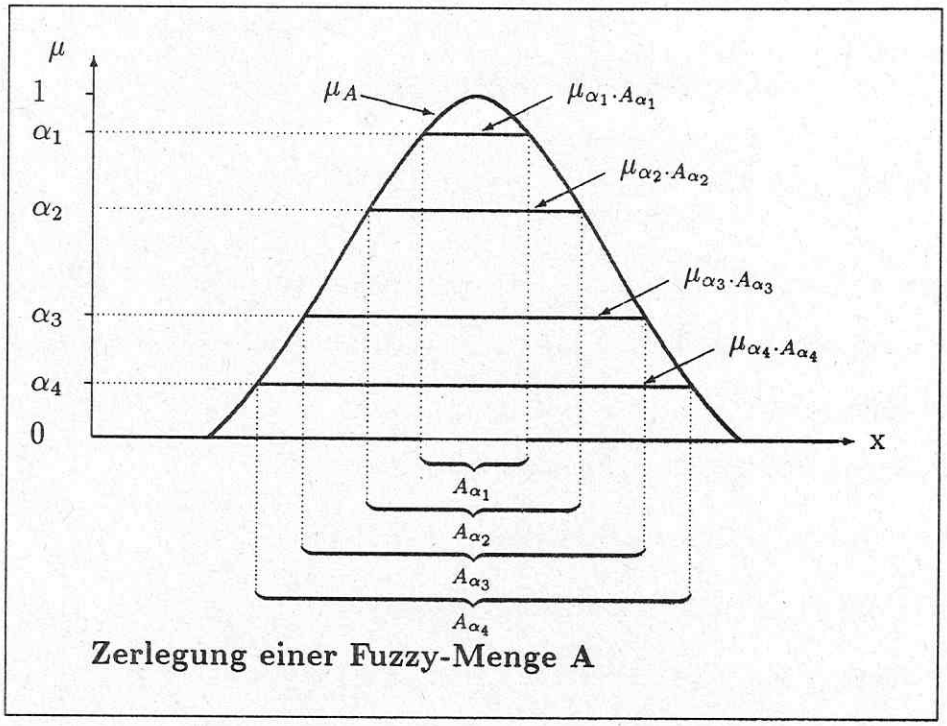


Abb. 2.3-3: Zerlegung einer Fuzzy-Menge

Das bedeutet, man kann jede Fuzzy-Menge resp. Fuzzy-Zahl in ihre α-Schnitte, d.h. in klassische Mengen zerlegen und umgekehrt auch wieder aus den α-Schnitten rekonstruieren.

Ein Beispiel zur Veranschaulichung liefert BÖHME (1993, S.36).

Gegeben ist die Grundmenge G = {a,b,c,d} mit der Fuzzy-Menge A über G:

A = 0.5/a + 0.1/b + 0.8/c + 1/d

mit den α-Schnitten von A:

$\alpha = 0.1$: $A_{0.1}$ = {a,b,c,d} = 1/a + 1/b + 1/c + 1/d

$\alpha = 0.5$: $A_{0.5}$ = {a,c,d} = 1/a + 1/c + 1/d

$\alpha = 0.8$: $A_{0.8}$ = {c,d} = 1/c + 1/d

$\alpha = 1$: A_1 = {d} = 1/d

zugehörige Produkte $\alpha * A_\alpha$:

$0.1 * A_{0.1}$ = 0.1/a + 0.1/b + 0.1/c + 0.1/d

$0.5 * A_{0.5}$ = 0.5/a + 0.5/c + 05/d

$0.8 * A_{0.1} =$ $0.8/c + 0.8/d$

$1 * A_{0.1} =$ $1/d$

Die Vereinigung wird durch das Maximum gebildet:

$0.5/a + 0.1/b + 0.8/c + 1/d$

Das Erweiterungs-Prinzip

Def. 4: Die Erweiterung einer Fuzzy-Menge A über der Grundmenge X erfolgt, indem man auf jedes x aus X die Abbildungsvorschrift f: $X \rightarrow Y$ anwendet. Damit ergibt sich die Fuzzy-Menge B auf der Grundmenge Y.

Die zugehörige Mitgliedschaftsfunktion ergibt sich aus μ_A .

$$\mu_{f(A)}(y) = \mu_B(y) = \sup\{ \mu_A(x) \mid y=f(x), x \in X \}$$

Für y_i aus Y, die keinem x aus X zugeordnet sind, gilt $\mu_B(y_i)=0$.

In anderen Worten, für ein y_i aus Y werden alle $x \in X$ betrachtet, für die f(x)=y gilt.

Gibt es nur *ein* solches x, dann gilt $\mu_{f(A)}(y) = \mu_A(x)$. Im Falle einer endlichen Menge solcher x ist $\mu_{f(A)}(y)$ das Maximum , bei einer unendlichen Menge das Supremum aus der Menge der zugehörigen $\mu_A(x)$.

Das nachfolgende Beispiel von BÖHME (1993, S.143) soll den Grundgedanken des Erweiterungsprinzips illustrieren.

Gegeben ist die Grundmenge X= {x1, x2, x3, x4, x5} mit der Fuzzy-Menge A über G.

A= {0.7/x1 + 0.1/x2 + 0.4/x3 + 0.5/x4 + 0.3/x5}.

Die Funktion y=f(x) soll X auf Y folgendermaßen abbilden:

$x1 \rightarrow y1$; $x2 \rightarrow y3$; $x3,x4,x5 \rightarrow y2$

Die sich daraus ergebende Fuzzy-Menge B auf der Grundmenge Y= {y1,y2,y3} ist

$B = f(A) = 0.7/f(x1) + 0.1/f(x2) + 0.4/f(x3) + 0.5/f(x4) + 0.3/f(x5)$

$= 0.7/y1 + 0.1/y3 + 0.4/y2 + 0.5/y2 + 0.3/y2$

$= 0.7/y1 + 0.5/y2 + 0.1/y3$ mit $\mu_B(y2) = \max(0.4, 0.5, 0.3)$

Die Erweiterungen der mengentheoretischen Aussagen auf Fuzzy-Mengen durch Verknüpfungen zweier Fuzzy-Mengen werden als binäre Relationen bezeichnet .

Def. 4a: Eine Fuzzy-Relation R von einer Menge X zu einer Menge Y ist eine unscharfe Teilmenge des kartesischen Produktes G = X × Y. [GRAUEL 1995 S.49]

$$G = X \times Y = \{(x,y) \mid x \in X \wedge y \in Y\}$$

$$\mu_R(x,y)=\min(\mu(x),\mu(y))$$

Erfolgt eine Erweiterung (des kartesischen Produkts) durch die klassische Funktion z=f(x,y) mit A(X) auf der Grundmenge X und A(Y)auf der Grundmenge Y dann ergibt sich die neue Fuzzy-Menge B auf Z für die gilt:

$$\mu_B(z) = \sup_{z=f(x,y)} \min [\mu_{A(X)}(x), \mu_{A(Y)}(y)]$$

Def.4b: Allgemein gilt für die Erweiterung mit einer beliebigen zweistelligen Operation '⊗'

$$\mu_A(x) = \mu_B(y) = a \Leftrightarrow \mu_{A\otimes B}(z) = a \qquad \text{mit } z = x \otimes y$$

Das besagt, daß für einen fest vorgegebenen Wert $\mu_{A\otimes B}(z) = a$ das Supremum (Maximum) aller Minima = a ist, d. h. es muß (mindestens) ein Paar (x_A, y_B) geben, für das gilt : $\mu_A(x) = \mu_B(y) = a$.

Das nachfolgende Beispiel soll diesen Grundgedanken für die Addition zweier Fuzzy-Zahlen illustrieren.

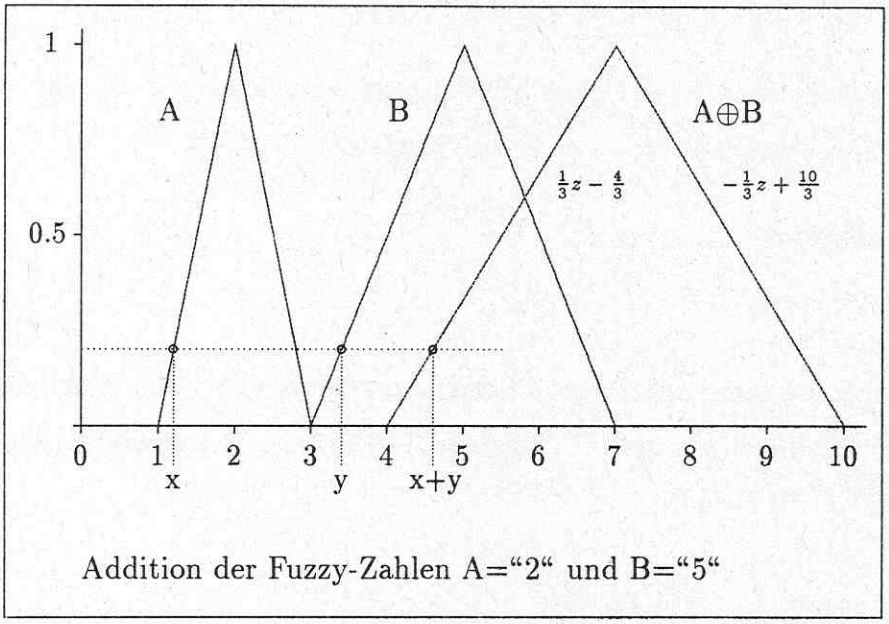


Abb. 2.3-4: Addition von Fuzzy-Zahlen

Gegeben sind die Fuzzy-Zahlen A = **2** und B = **5** als trianguläre Fuzzy-Zahlen.

$$A = \underline{2} = \int_1^2 x - 1/x + \int_2^3 3 - x/x$$

$$B = \underline{5} = \int_3^5 \tfrac{1}{2}y - \tfrac{3}{2}/y + \int_5^7 \tfrac{7}{2} - \tfrac{1}{2}y/y$$

Gemäß der Notation für Fuzzy-Mengen stellt z.B. der linke Term der Fuzzy-Zahl **2** die ***Menge*** (nicht das Riemann Integral !) der Werte der Zugehörigkeitsfunktion $y = x - 1$ für $1 \leq x \leq 2$ und der rechte Term die entsprechenden Werte der Funktion $y = 3 - x$ für $2 \leq x \leq 3$ dar.

Bei der Ermittlung des analytischen Ausdrucks der Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Zahl A⊕B müssen der linke und rechte Teil getrennt berechnet werden.

linker Teil:

$\mu_A(x) = x-1,\ 1 \leq x \leq 2$ und $\mu_B(x) = \frac{1}{2}y - \frac{3}{2},\ 3 \leq y \leq 5$

Aus $\mu_B(x) = \mu_B(y) = a$ folgt für den linken Teil:

$x - 1 = a \rightarrow x = a + 1$

$\frac{1}{2}y - \frac{3}{2} = a \rightarrow y = 2(a+\frac{3}{2})$, und mit $z = x + y$ ergibt sich

$z = a+1+2a+3 = 3a + 4, \quad 4 \leq z \leq 7$

$a = \mu_{A\oplus B}(z) = \frac{z-4}{3} = \frac{1}{3}z - \frac{4}{3}$

rechter Teil: $\mu_A(x) = 3 - x, \quad 2 \leq x \leq 3$ und $\mu_B(y) = \frac{7}{2} - \frac{1}{2}y/y, \quad 5 \leq y \leq 7$

Aus $\mu_A(x) = \mu_B(y) = a$ folgt für den rechten Teil:

$3 - x = a \rightarrow x = 3 - a$

$\frac{7}{2} - \frac{1}{2}y = a \rightarrow y = 2(\frac{7}{2} - a)$, und mit $z = x + y$ ergibt sich

$z = 3 - a + 7 - 2a = 10 - 3a, \quad 7 \leq z \leq 10$

$a = \mu_{A\oplus B}(z) = \frac{1}{3}(10 - z) = \frac{10}{3} - \frac{1}{3}z$

$$A \oplus B = \int_4^7 \tfrac{1}{3}z - \tfrac{4}{3}/z + \int_7^{10} \tfrac{10}{3} - \tfrac{1}{3}z/z = \text{'}\underline{7}\text{'}$$

In analogerweise Weise erfolgt auch die Multiplikation, Subtraktion und Division. Allerdings ist das Ergebnis nicht in jedem Fall wieder eine Fuzzy-Zahl (vgl. BÖHME 1993). ROMMELFANGER (1988) zeigt desweiteren eine Möglichkeit, mit sogenannten „diskretisierten" Fuzzy-Zahlen (vgl Def.2 (5)), die man sich als einzelne ausgewählte Werte des zugehörigen analytischen Ausdrucks entsprechender Fuzzy-Zahlen vorstellen kann, vergleichbare Operationen durchzuführen.

Das obige einfache Rechenbeispiel mit symmetrischen triangulären Fuzzy-Zahlen zeigt bereits, daß die Berechnung des analytischen Ausdruckes der Ergebniszahl in Abhängigkeit vom Typ der Zugehörigkeitsfunktion und der mathematischen Operation sehr aufwendig sein kann. Deshalb wird in der Praxis der Aufwand zur Ermittlung des analytischen Ausdrucks, sofern eine exakte Lösung möglich ist (vgl. LEUNG a.a.O. S. 46), umgangen. Meist ist im Sinne der nachfolgenden notwendigen Defuzzifizierung nicht der analytische Ausdruck der Ergebniszahl sondern deren Schnittmenge (vgl.Def. 3) interessant, die für einen entsprechenden Möglichkeits-/Zugehörigkeitsgrad α konstruiert werden kann. Deshalb verwendet man bei derartigen Operationen mit Fuzzy-Zahlen deren α-Schnittmengen, um dann mit gewöhnlichen Mengen rechnen zu können.

Falls im konkreten Fall die Fuzzy-Menge A einer klassischen Menge C entspricht, das heißt

$\mu_A(x) = \chi_C(x)$ (χ ist die charakteristische Funktion von C)

dann gilt nach dem Erweiterungs-Prinzip

$\mu_{f(A)}(y) = \chi_{f(C)}(y)$.

So gesehen ist die Anwendung der Abbildungsvorschrift 'f' auf Fuzzy-Sets eine Erweiterung dieser Vorschrift auf klassische Mengen, die ihrerseits eine Erweiterung auf die Elemente x aus X darstellt.

Analog gilt für eine Fuzzy-Zahl A gemäß dem Zerlegungs- und dem Erweiterungsprinzip (Def. 3 , Def. 4a,b) folgende Relation:

$f(A)_\alpha = f[A_\alpha]$ falls f eine stetige Funktion ist.

Wird das Erweiterungsprinzip auf mehrere Fuzzy-Sets (Variable) angewandt (vgl.Def. 4) , hier für das Paar (A, B), ist

$\mu_{f(A, B)}(y) = \mu_{f(A \otimes B)}(y)$

für eine beliebige Operation $\otimes$. Analog gilt für die α-Schnitte

$f(A, B)_\alpha = f[A_\alpha, B_\alpha]$ falls f eine stetige Funktion ist.

Sei '$\otimes$' z. B. eine Multiplikation, entspricht das Produkt der Fuzzy-Mengen (A, B) gleich dem Produkt ihrer α-Schnittmengen, wobei der Term auf der linken Seite das Produkt von Fuzzy-Mengen und auf der rechten Seite von klassischen Mengen ist. Dabei ist zu beachten, daß die α-Schnittmengen im Falle von Fuzzy-Zahlen kompakte, verbundene, reellwertige Intervalle bilden, deren Anfangs- und Endwerte vom gewählten α-Level bestimmt sind.

Der oben vorgestellte Formalismus gestattet nun die Einführung von Fuzzy-Zahlen als Inputgrößen in klassischen mathematischen Verfahren.

2.4 Fuzzy Control Tools und Fuzzy Shells

Dirk Schmidt

Der Begriff *Fuzzy-Control* (FC) stammt aus dem Bereich der Regelungstechnik und umfaßt Methoden zur Steuerung von Verfahren oder technischen Prozessen, die auf der Fuzzy-Set Theorie basieren. Die Motivation des FC war es, menschliches Erfahrungswissen bei der Regelung komplexer industrieller Steuerungsprozesse in einen Regler zu übertragen. Der Vorteil des FC in der Regelungstechnik gegenüber konventionellen Ansätzen besteht darin, daß ein FC-System eine eindeutige Systembeschreibungsmethode ermöglicht, die dem menschlichen Denken in wesentlich höherem Maße entspricht, als die herkömmliche Regelungstechnik dazu in der Lage wäre. Dadurch können 'Daumenregeln', Intuition und Erfahrungswissen von Experten in einem Steuerungssystem implementiert werden. Das Ziel des FC ist die Übertragung menschlichen Erfahrungswissens in die Regelung komplexer industrieller Steuerungsprozesse (TILLI, 1991).

Bei *Fuzzy-Control-Tools* und *Fuzzy-Shells* handelt es sich um Softwaresysteme, die über FC-Methoden der Wissensrepräsentation und Wissensverarbeitung verfügen. Sowohl FC-Tools, als auch Fuzzy-Shells weisen die Grundstruktur eines Fuzzy-Reglers auf, welcher, basierend auf Eingangswerten, mittels eines über Regeln gesteuerten Fuzzy-Inferenzsystems Ausgabewerte berechnet (Abbildung 2.4-1).

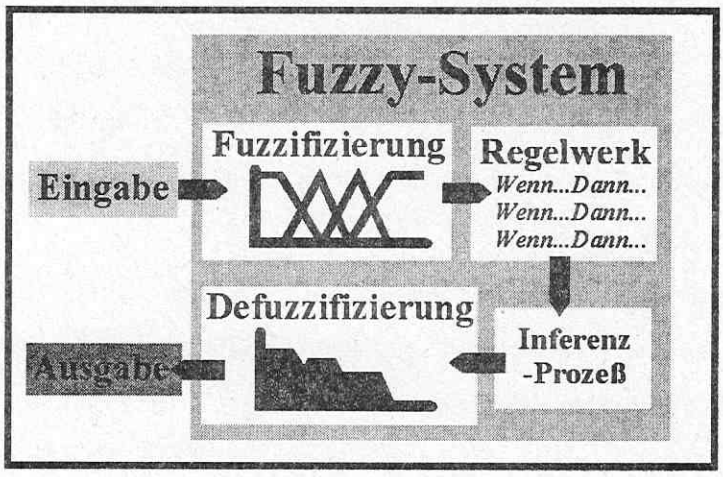


Abb. 2.4-1: Prinzipieller Aufbau eines Fuzzy-Systems

Die methodischen Unterschiede der beiden Instrumente FC-Tool und Fuzzy-Shell sind in ihren verschiedenen Anwendungsgebieten begründet.
FC-Tools sind zur Steuerung technischer Prozesse entwickelt worden und sind darauf ausgelegt, möglichst schnell und sicher, basierend auf von Sensoren gemessenen Eingangswerten, Ausgabewerte (sogenannte *Stellgrößen*) zur Steuerung technischer Prozesse zu liefern. Sie werden schon seit längerem in technischen Produkten wie beispielsweise in Autofokus-Kameras, in Waschmaschinen, in Anti-Blockier-Systemen (ABS) oder sogar in U-Bahn-Steuerungen erfolgreich eingesetzt und finden zunehmend Anwendung in kommerziellen technischen Entwicklungen. Fuzzy-Regler zeichnen sich im Vergleich zu konventionellen (nicht-fuzzy) Steuerungen besonders durch ihre hohe Fehlertoleranz und damit hohe Systemstabilität aus.

Fuzzy-Shells dagegen nutzen zwar im Prinzip die gleichen FC-Methoden, verwenden diese aber mit dem Ziel menschliches Entscheidungsverhalten nachzubilden. Mit Hilfe *linguistischer Variablen* und *Regelwerken* ist es mit ihnen möglich, menschliches Entscheidungsverhalten, nach dem Prinzip des *approximativen Schließens*, zu modellieren. Im Gegensatz zu den technisch genutzten FC-Tools findet bei den Fuzzy-Shells die System-Eingabe nicht durch eine automatisierte kontinuierliche Eingabe gemessener Sensorenwerte statt, sondern durch Eingabe einzelner Werte durch den Systemanwender über eine dafür vorgesehene Benutzerschnittstelle. In der Regel handelt es sich dabei nicht wie beim FC um quantitative Meßwerte, sondern um beschreibende, qualitative Informationen. Während FC-Tools also dafür ausgelegt sind, permanent Eingangsdaten zu bekommen und dementsprechend laufen Ausgabewerte zu errechnen, sind die mit einer Fuzzy-Shell erstellten Systeme für die Bearbeitung einzelner, dafür aber meist komplexerer Eingaben konzipiert.

Während das Ziel des technischen Fuzzy-Control in der schnellen und 'robusten' Berechnung meist nur einer Stellgröße, basierend auf der Analyse weniger Meßwerte liegt, sind Fuzzy-Shells darauf ausgerichtet, aufgrund unscharfer Informationen komplexes menschliches Entscheidungsverhalten zu simulieren. Fuzzy-Shells zeichnen sich besonders durch eine gute Unterstützung der interaktiven Erstellung des Systems (graphische Definition der Fuzzy-Sets, Formulierung der Regelbasis in einem Texteditor, anschauliche Visualisierung des Systems, der Verarbeitungsschritte und der Ergebnisse) und vor allem durch die Bereitstellung

unterschiedlicher Inferenz- und Defuzzifizierungsmethoden, die das Modellieren individuellen Entscheidungsverhaltens möglichst vielseitig und flexibel unterstützen, aus.
Haben diese beiden grundsätzlich unterschiedlichen Anwendungsbereiche, der *technischen Prozeßsteuerung* einerseits und der *Modellierung menschlichen Entscheidungsverhaltens* andererseits zunächst zur Entwicklung unterschiedlicher Software geführt, so steht heute eine Vielzahl kommerzieller Software-Tools zur Verfügung, die (nicht zuletzt aufgrund der Leistungssteigerung der Hardware und der Vereinheitlichung der Benutzerschnittstellen unter Windows-Oberflächen) prinzipiell beide Arten der Anwendung (mehr oder weniger gut) ermöglichen. Meist kann die Steuerung technischer Prozesse direkt über 'Dynamic Data Exchange' (DDE) automatisiert werden oder mit Hilfe von Import- und Export-Dateien simuliert werden. Die Produkte bieten außerdem meist die Möglichkeit, erstellte Fuzzy-Systeme als C-Programme zu speichern, um sie in anderen Anwendungen zu implementieren. Die Fuzzy-Shell - Anforderungen werden durch eine gute Unterstützung des Benutzers bei der interaktiven Systemerstellung, sowie durch eine möglichst große Auswahl an unterschiedlichen Fuzzy-Sets, Operatoren, Inferenzverfahren und Interpretationsmöglichkeiten der Ergebnisse erfüllt.

Einige Beispiele für derartige Software-Tools sind *CubiCalc* (HYPERLOGIC CORPORATION 1993), *Fuzzy-Toolbox* (Matlab), *SieFuzzy* (Siemens), *FuzzyShell* (Ingenieurbüro Tilli [TILLI 1993]) *FCM* (TransferTech), oder das ursprünglich für didaktische Zwecke entwickelte *WinFACT-FLOP* (Ingenieurbüro Kahlert). Je nachdem in welchem methodischen Anwendungsbereich die Entwicklung dieser Tools erfolgte (z.B. Steuerungstechnik, Bildanalyse, Entscheidungsunterstützung, medizinische Diagnostik, Bonitätsprüfung, Lehre, etc.), weisen die Produkte teilweise erhebliche Unterschiede hinsichtlich folgender Punkte auf:

- mögliche System-Komplexität (Anzahl und Art der möglichen Fuzzy-Sets, Operatoren, Input- und Output-Variablen),
- Schnittstellen (Im- und Export-Möglichkeiten und Kopplung an andere Software),
- erforderliche Vorkenntnisse der Fuzzy-Set-Theorie ,
- Anpassung des Systems durch eigene Programmierung,
- Benutzerfreundlichkeit (teilweise eigene Programmiersprachen),
- Hardware-Anforderungen, Performance (Geschwindigkeit, Ressourcenbedarf),

– Preis.

Auf eine Gegenüberstellung vorhandener Systeme wird an dieser Stelle verzichtet, da sie, aufgrund der schnellen Entwicklung in diesem Software-Sektor, ohnehin nicht lange aktuell wäre.

Im Folgenden soll auf das Konzept und die Erstellung von Fuzzy-Systemen näher eingegangen werden. Die Ausführungen basieren auf Erfahrungen mit der Software *CubiCalc* der amerikanischen Firma HyperLogic, können aber prinzipiell auf andere moderne Fuzzy-Software-Tools übertragen werden.

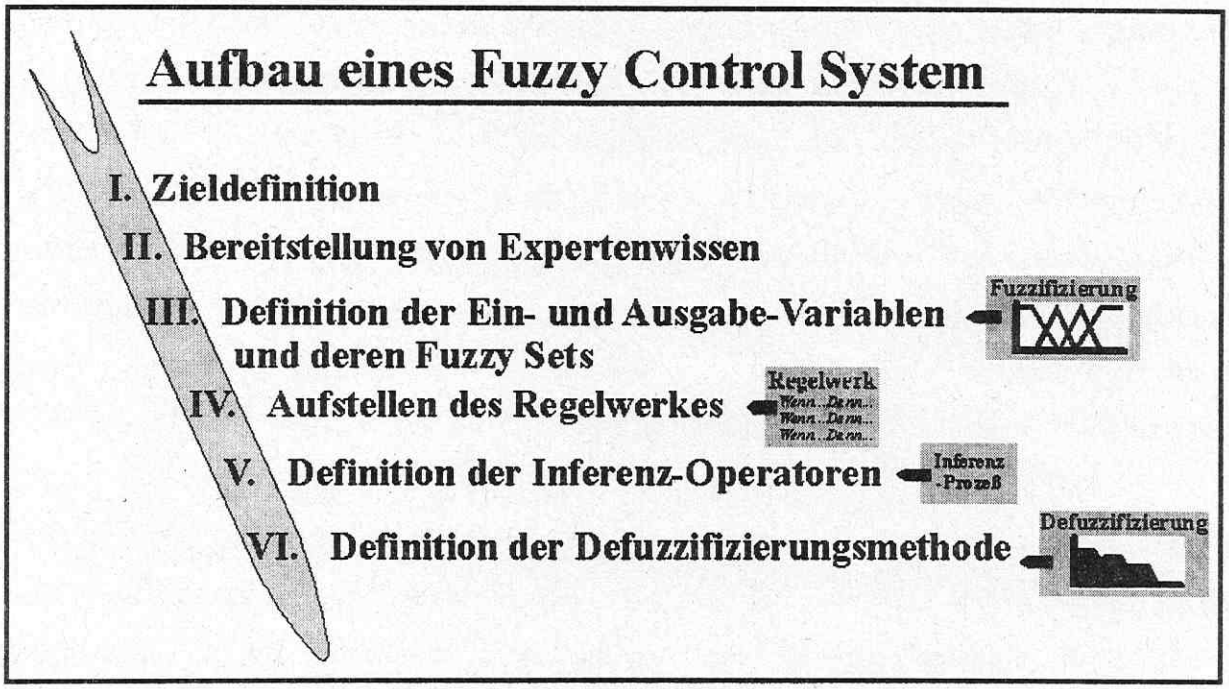


Abb. 2.4-2: Schritte zur Erstellung eines Fuzzy-Control Systems

Bevor man beginnt, ein Fuzzy-System software-technisch aufzubauen, sollte exakt definiert sein, 1. welche genaue Funktion das System leisten soll (Ziel-Definition), 2. welche Daten zur Verfügung stehen oder noch erhoben werden müssen und 3. welche relevanten Informationen aus diesen Daten abgeleitet werden können. Da es sich um ein wissensbasiertes Verfahren handelt, sollte des weiteren vorher abgeklärt werden, ob genügend relevantes Experten-Wissen zur Verfügung steht oder welche Quellen hierfür zusätzlich genutzt werden können. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, kann mit der Erstellung des Fuzzy-System begonnen werden.

Zunächst werden die Eingabe- und Ausgabe-Variablen benannt, deren Wertebereiche festgelegt und die sie beschreibenden Fuzzy-Sets in einem graphischen Editor (meist über

Dreiecks-Funktionen) definiert. Anschließend wird das Regelwerk in einem Texteditor oder in einer Matrix-Darstellung in folgender Struktur festgelegt:

"WENN Input-Variable I ist *Ausprägung a*
UND Input-Variable II ist *Ausprägung b*
UND Input-Variable III ist *Ausprägung c* ....
DANN Output-Variable ist *Ausprägung x*."

Die Definition der Fuzzy-Sets hinsichtlich ihrer Form, ihrer Überschneidungsbereiche und ihrer Benennung muß dabei so erfolgen, daß das im Regelwerk abgebildete Systemverhalten möglichst treffend repräsentiert wird. Im nächsten Schritt wird der Inferenz-Prozeß entsprechend dem angestrebten Systemverhalten festgelegt. Dazu wird definiert, welche Fuzzy-Operatoren zur Verknüpfung der "WENN..." - Bedingungen innerhalb einer Regel zum Einsatz kommen und mit welchen Operatoren die Ergebnisse der einzelnen Regeln miteinander kombiniert werden, so daß die berechneten Ergebnis - Fuzzy-Sets möglichst 'aussagekräftig' sind. Je nach Art der Systemanwendung muß nun noch festgelegt werden, in welcher Form die Ausgabe der Ergebnisse erfolgen soll. Ist beispielsweise die Ausgabe eines exakten Wertes als Stellgröße eines Steuerungsprozesses oder als Ergebnis einer eindeutigen Klassifikation angestrebt, so kann meist zwischen der *Flächen-Schwerpunkt*-Methode oder der *maximale Zugehörigkeit*-Methode zur Defuzzifizierung gewählt werden. In manchen Anwendungen ist es aber auch sinnvoll das Ergebnis in Form der Ausgabe-Fuzzy-Sets, als dreidimensionale Regler-Kennflächen oder als Auflistung der Mehrfach-Zugehörigkeiten zu allen möglichen Ausgabevariablen zu erhalten. Weitere Konfigurationsmöglichkeiten des Systems beziehen sich auf unterschiedliche Visualisierungsformen des Inferenzprozesses oder auf das Automatisieren der Eingabewerte über Import- oder DDE-Funktionen, sowie entsprechende Optionen für die Ausgabewerte. Eine Kombination mehrerer Fuzzy-Systeme, wie sie oft bei komplexeren Steuerungsprozessen oder bei hierarchischen Entscheidungsprozessen sinnvoll ist, wird so ermöglicht. Des weiteren unterstützt das System den Anwender während der Systemdefinition durch eine automatische Konsistenzkontrolle bezüglich der Definition der Variablen und des Regelwerks. Die erstellten Fuzzy-Systeme können als einzelne Datei gespeichert werden und stehen somit jederzeit wieder zur Verfügung. Dies ist besonders dann hilfreich, wenn beispielsweise nur die Regelbasis oder die Eingangswerte eines Systems verändert werden sollen. Für die Einbindung des Fuzzy-Systems

in andere Informationsverarbeitungssysteme oder zur Weitergabe an Dritte bieten einige Systeme die Möglichkeit, aus dem erstellten Fuzzy-System einen Programmcode zu erstellen.

Abschließend sollen noch kurz einige Vorzüge von Fuzzy-Control-Verfahren gegenüber konventionellen, auf der dualen Logik basierende, Verfahren angesprochen werden.
Fuzzy-Control-Verfahren sind besonders dann hilfreich, wenn ein System abzubilden ist, das nicht exakt meßtechnisch-, sondern nur durch empirisches Vorgehen zu erfassen ist. Sie weisen auch dann eindeutig Vorteile auf, wenn der Prozeßexperte (wie häufig der Fall) ein 'Modellierungs-Laie' ist, den Regler aber dennoch selbst entwerfen soll oder, wenn die Notwendigkeit besteht das Regler- bzw. Systemverhalten anderen verständlich zu vermitteln. Die natürlichsprachlichen "WENN..., DANN..." - Anweisungen des Regelwerkes machen das Systemverhalten nachvollziehbarer als mathematische Funktionen dies könnten. Fuzzy-Control-Verfahren funktionieren außerdem aufgrund geringerer Anforderungen an die Datengenauigkeit meist *stabiler* und bieten die Möglichkeit '*Intelligenz*', durch in Regeln formuliertes Expertenwissen, im System zu implementieren.

Ein häufiger Vorwurf an Fuzzy-Systeme ist, daß sie zu *unsicher* oder zu *ungenau* arbeiten würde. Dies ist darauf zurückzuführen, daß *Unschärfe* mit *Ungenauigkeit* verwechselt wird. Es ist leicht zu belegen, daß durch die Definition der Zugehörigkeitsfunktionen, sowie der Operatoren für die Aggregation und Inferenz und die Berechnungsmethode der Ausgabewerte eine mathematisch eindeutige Abbildung der System-Eingabe auf die System-Ausgabe gewährleistet ist. Diese läßt sich in einigen Systemen auch in einer stark nichtlinearen *Regler-Kennfläche* visualsieren. Da das Abbilden menschlichen Erfahrungswissens in Form von Regeln nicht nur für die Steuerung von technischen Prozessen interessant ist, sondern auch Möglichkeiten zum Aufbau von wissensbasierten Systemen (*Expertensysteme*) bietet, drängt sich die Frage auf, in wie weit derartige Fuzzy-Systeme auch für die Lösung von Fragestellungen in anderen Anwendungsbereichen einzusetzen sind.

Weiterführende Informationen zum Thema Fuzzy-Control finden sich unter anderem bei KOSKO (1993) und ZADEH (1996).

3 Anwendungsbeispiele

3.1 Anwendung eines Fuzzy-Klassifikationssystems zur wissensbasierten Thermalbildauswertung

Dirk Schmidt

Im Folgenden soll gezeigt werden, wie ein in Kapitel 2.4. angesprochenes Fuzzy-Control-System dazu eingesetzt werden kann, eine auf Expertenwissen basierte Klassifikation von multitemporalen Thermaldaten durchzuführen. Ziel der Klassifikation war die Erstellung einer Thermotop-Karte der Stadt Herne. Als Thermotope werden Flächen gleichen Temperaturverhaltens bezeichnet. Die räumliche Verteilung der Thermotope liefert dem Planer Informationen über lokalklimatische Verhältnisse, die in den Thermalbildplänen nicht direkt zu erkennen sind. Das hier vorgestellte Verfahren war Bestandteil einer 1995 abgeschlossenen Diplomarbeit am Institut für Geographie der Universität Bonn in Zusammenarbeit mit dem Kommunalverband Ruhrgebiet (KVR 1990), in der die Thermalbildanalyse als ein Beispiel für eine Applikation multivariater Fuzzy-Klassifikationen räumlicher Objekte durchgeführt wurde (SCHMIDT, 1995a, 1995b). Das Ziel war die computertechnische Nachbildung eines seit Jahren beim KVR bewährten manuellen Verfahrens zur Erstellung von Klimatopkarten auf der Basis von Tag- und Nachtthermalbildplänen und eines Flächennutzungsplanes (STOCK & BECKRÖGE, 1983, STOCK 1992). In diesem Verfahren erstellt ein Stadtklima-Experte aufgrund des visuellen Vergleichs der beiden Thermalbildpläne und des Flächennutzungsplanes und unter Verwendung seines Erfahrungswissens und seiner Ortskenntnis, sowie unter Berücksichtigung klimatologischer Meßreihen (*synthetischen Analyse*), *Klimatop*-Karten, die den Stadt- und Regionalplanern als Arbeitsgrundlagen dienen. Das in der Diplomarbeit angewandte Verfahren wurde durch Kopplung des rasterbasierten Geographischen Informationssystems *IDRISI* mit der Fuzzy-Control-Software *CubiCalc* (HYPERLOGIC CORPORATION 1993) realisiert. Es stellt in sofern eine Vereinfachung des synthetischen Verfahrens dar, als daß auf klimatologische Meßreihen verzichtet wurde. Die Arbeit hat dennoch gezeigt, daß durch die Kopplung eines GIS mit einem Fuzzy-Control-System ein Instrument gebildet werden kann, mit dem es relativ einfach möglich ist, wissensbasierte Thermalbildanalysen zu unterschiedlichen stadtklimatologischen oder klimaökologischen Fragestellungen durchzuführen.

Für die Kopplung von GIS mit einem Fuzzy-Control-System wurde u.a. auf Arbeiten von MANDL (1992, 1993) zurückgegriffen

Die Motivation zur Nachbildung des eben beschriebenen Verfahrens (zur Erstellung von Klimatop-Karten) einen Fuzzy-Ansatzes zu verwenden, basierte auf einer Studie des KVR. Dort umschreibt STOCK (1992) ein grundlegendes Problem aller räumlicher Abgrenzungen klimatologischer Größen folgendermaßen: *"gegenseitige Beeinflussungen, sanfte Übergänge und Variationen innerhalb der Klimatope lassen es fast unmöglich erscheinen, kleine Räume durch Klimaelemente abgrenzen zu wollen"*. Es sollte in der Diplomarbeit gezeigt werden, daß ein Fuzzy-Klassifikationsansatz besser dazu in der Lage ist, *sanfte Übergänge und Variationen innerhalb der Klimatope* zu modellieren, als dies 'konventionelle' Klassifikationsverfahren leisten könnten. Darüber hinaus sollte der Vorteil eines regelbasierten Systems, das für die Klassifikation nötige Wissen an klimatologischer Erfahrung und Ortskenntnis in Form von Regeln in das System zu implementieren, genutzt werden.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die neun Zielkategorien, die sich in drei Gruppen von je drei Thermotoptypen gliedern lassen.

Tab. 3.1-1: Gruppierung der neun Thermotoptypen

Gruppe	Thermotoptyp
durch **Bebauung** bestimmt	Industrie/Gewerbe Thermotop
	Stadt Thermotop
	Siedlungs Thermotop
durch **Vegetation** bestimmt	Wald Thermotop
	Park Thermotop
	Freiland Thermotop
durch **Bodenmaterial** bestimmt	Gewässer Thermotop
	Straßen/Asphalt Thermotop
	Schotter/Gleis Thermotop

Analog zu dem von STOCK angewandten Verfahren stehen der hier vorgestellten Arbeit ebenfalls zwei im GIS gespeicherte Thermalaufnahme (Tag- / Nacht-) sowie ein digitaler Datensatz der Flächennutzung zur Verfügung (Abbildungen 3.1-1 bis 3.1-3). Aufgrund der geringen Reliefenergie im Untersuchungsgebiet wurde auf die Berücksichtigung der Geländeform verzichtet.

Eine digitalisierte Flächennutzungskarte der Region wurde in das Rasterformat der Thermaldaten konvertiert. Die für die Arbeit verwendeten Thermaldaten der Tag-Situation wurden bei einer Befliegung am 30.06.1993 zwischen 15:09 Uhr und 15:35 Uhr MESZ aufgenommen. Die Befliegung für die Nacht-Situation erfolgte am 01.07.1993 zwischen 01:36 Uhr und 02:00 Uhr MESZ. Als Aufnahmesystem wurde ein flugzeuggetragener multispektraler Linescanner des Typs *Daedalus DS 1260* verwendet. Dieses Aufnahmesystem ist in der Lage die Oberflächenstrahlungstemperaturen (OST) in einem Spektralbereich zwischen 8,5 µm und 13,5 µm zu erfassen.

Neben der digitalen Information der Ausprägungen der flächenbezogenen Daten der *OST* und der *Flächennutzung* benötigt das Modell möglichst umfangreiches Expertenwissen, um die Thermotop-Klassifizierung durchzuführen. Die Qualität der Modellergebnisse hängt entscheidend davon ab, wie gut es gelingt, das für die Klassifizierung relevante Wissen, welches der Bearbeiter einer manuellen Thermalbildanalyse aufgrund seiner klimatologischen Erfahrungen oder zusätzlich erhobener Informationen (z.B. Messungen) hat, in das System zu implementieren. Die Aufgabe der Wissensrepräsentation des *Fuzzy-Systems* fällt der Definition der Input-Fuzzy-Sets und der Aufstellung des Regelwerks zu.

Der methodische Rahmen des Modells zur *wissensbasierten Thermalbildanalyse* wird im Folgenden beschrieben. Zunächst findet innerhalb des *GIS* eine Analyse des Temperaturverhaltens ausgewählter Flächennutzungsareale durch Verschneidung mit den Datensätzen der Tag und Nacht Thermaldaten statt. Das Ergebnis dieser Analyse fließt, zusammen mit den durch Literaturrecherche und Expertenbefragung gewonnenen Informationen über das OST-Verhalten spezifischer Nutzungen, als 'Modell-Wissen' in die Definition der Fuzzy-Sets und den Aufbau des Regelwerkes ein. Das modular aufgebaute *Fuzzy-Klassifikationssystem* erhält als Input eine ASCII-Datei, in der die Tag/Nacht OST-Werte pixelweise aufgelistet sind. Als Output liefert das System zum einen den diskreten Datensatz der klassifizierten Thermotoptypen und außerdem noch neun weitere Datensätze,

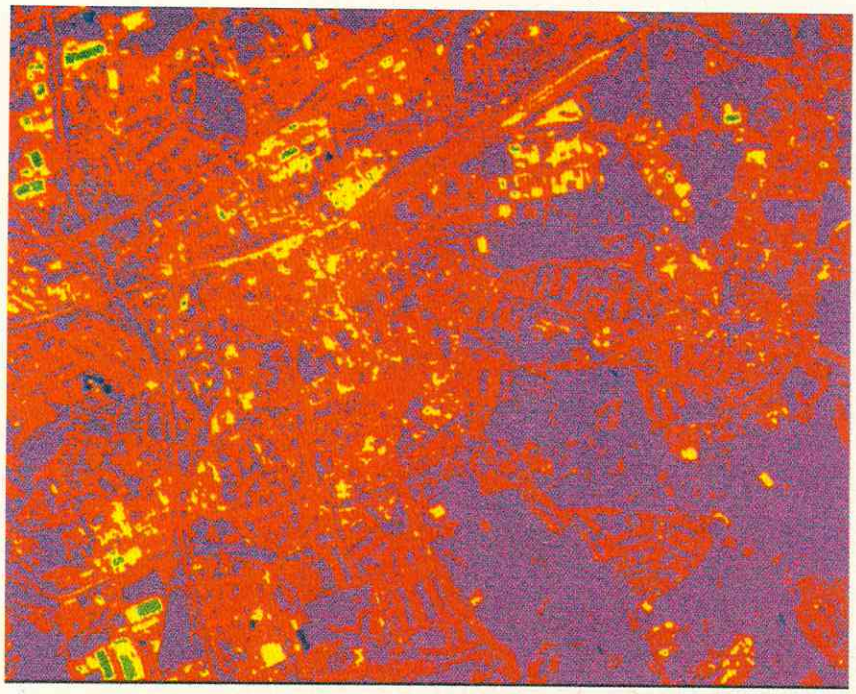


Abb. 3.1-1: Thermaldaten - Tag

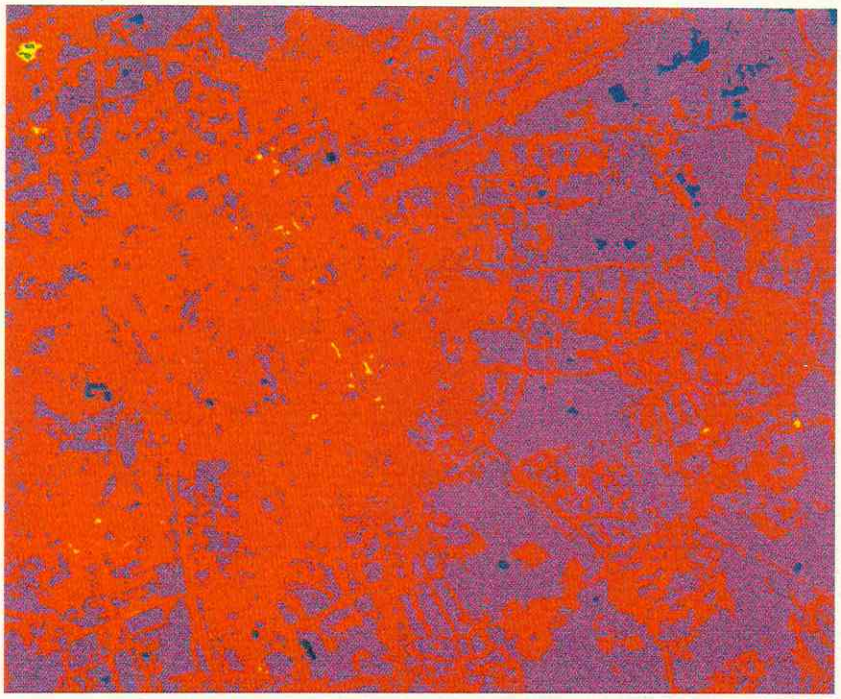


Abb. 3.1-2: Thermaldaten - Nacht

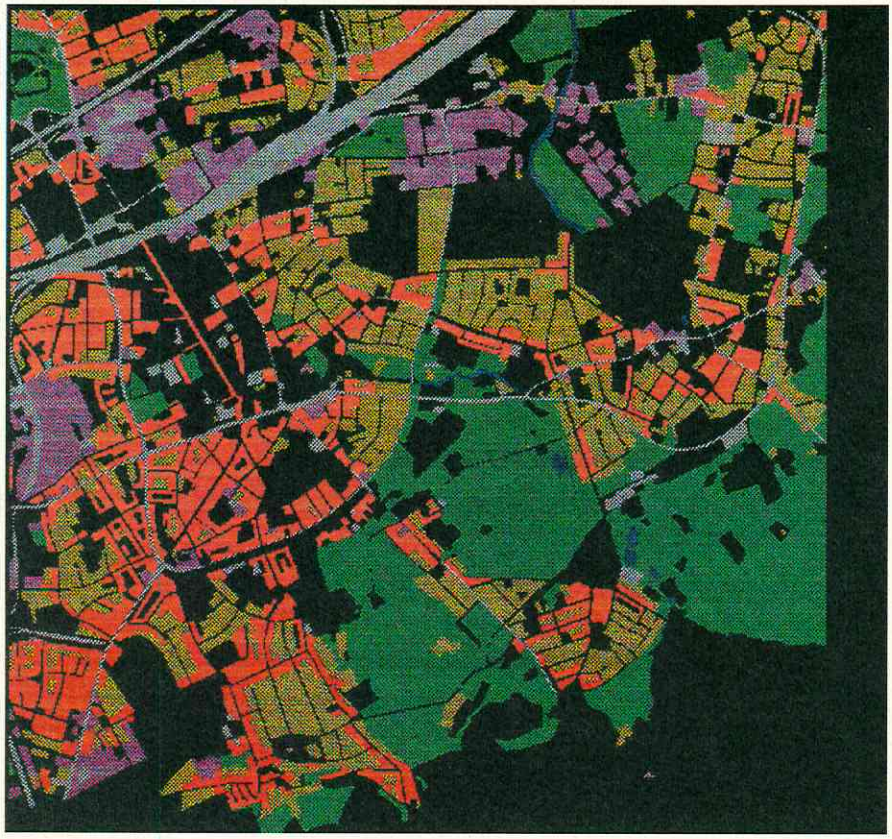


Abb. 3.1-3: Klimarelevante Flächennutzungstypen

die die 'unscharfe' Information der graduellen Zugehörigkeit zu jedem der möglichen Thermotoptypen enthalten. Diese als ASCII-Log-File gespeicherten Output-Datensätze werden dann über eine Schnittstelle in das *GIS* importiert und können anschließend dort visualisiert und weiterverarbeitet werden. Einen Ausschnitt der so entstandenen Thermotop-Karte sowie eines Ausschnittes der Fuzzy-Wald-Karte zeigen die nachfolgenden Abbildungen 3.1-4 und 3.1-5.

Abbildung 3.1-5 zeigt in einem Ausschnitt den Grad der Zugehörigkeit zum Thermotoptyp *Wald*. Dieser kann auch interpretiert werden, als Maß für die Ähnlichkeit des örtlichen Oberflächenstrahlungsverhalten mit dem als 'typisch für einen Wald' festgelegten OST-Verhalten. Je heller die Flächen erscheinen, desto höher sind deren Zugehörigkeitswerte zur Klasse *Wald*. Sanfte Übergänge an den Randbereichen der Thermotope sind ebenso gut zu erkennen, wie Variationen innerhalb der Thermotope.

Abschließend sollen einige Ergebnisse des Verfahrens festgehalten werden. Die in den beiden Thermalbildern enthaltenen Informationen wurden wissensbasiert zu neun unterschiedlichen Thermotop-Kategorien aggregiert, deren OST-Verhalten in einem Regelwerk definiert wurde. Die errechnete Thermotop-Karte weist Flächen aus, auf denen sich ein ähnliches, charakteristisches Temperaturverhalten ausbildet. Mit Hilfe der Fuzzy-Zugehörigkeits-Datensätze wird Zusatzinformation über den Grad der Zugehörigkeit zu allen möglichen Thermotoptypen verfügbar. Diese läßt sich beispielsweise dazu nutzen, fließende Übergänge an den Rändern der Thermotope, sowie die Variationen oder Strukturen innerhalb der Thermotope erkennbar zu machen. Dies ist beispielhaft für den Thermotoptyp *Wald* in der Abbildung 3.1-6 durch die Kombination des diskreten Datensatzes und des Fuzzy-Datensatzes dargestellt.

Ein weiterer Vorteil des hier dargestellten *Werkzeugs zur Thermalbildanalyse* liegt darin, daß es sich durch relativ einfache Modifikation des Regelwerks sowie der Output-Variablen für andere klimatologische oder planungsbezogene Fragestellungen verwenden läßt. Nach Definition von vier neuen Output-Variablen und dem Ersetzen des Regelwerkes durch acht neue Regeln wurde der Datensatz der *Klimafunktionsräume* errechnet, der in Abbildung 3.1-7 dargestellt ist.

Abb. 3.1-4: Thermotop-Karte

Abb. 3.1-5: Fuzzy-Zugehörigkeitskarte zum *Wald*-Thermotop (Ausschnitt)

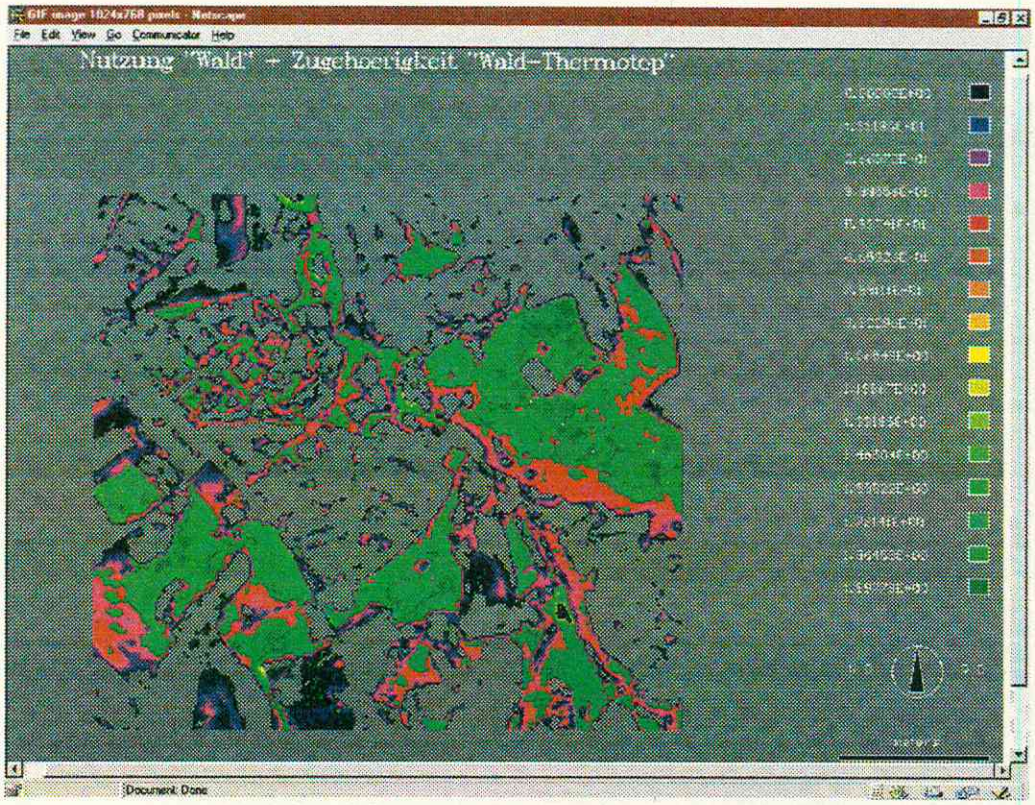


Abb. 3.1-6: Kombination von fuzzy und diskretem Klassifikationsergebnis der Klasse *Wald*-Thermotop

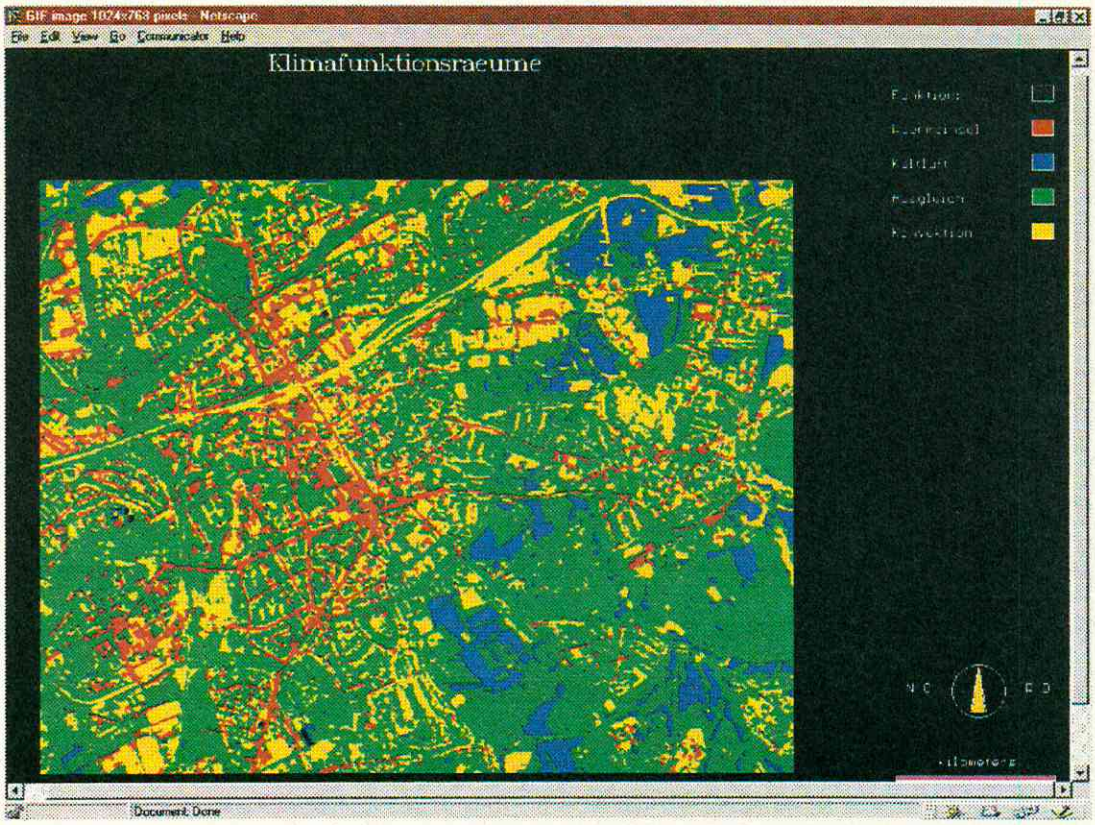


Abb. 3.1-7: Klimafunktionsräume

Es hat sich gezeigt, daß die Verwendung eines 'Fuzzy'-Klassifikationsmodells im Vergleich zu herkömmlichen 'scharfen' Klassifikationsverfahren (z.B. Maximum-Likelyhood-Verfahren) Vorteile bietet, die sich besonders in der relativ einfachen Erstellung des Entscheidungsmodells, der flexiblen Ausbaufähigkeit des Systems, der Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Verarbeitungsschritte, der kartographischen Präsentationsmöglichkeit räumlicher Unschärfe und nicht zuletzt in dem, für eine eventuelle Weiterverarbeitung der Daten nützlichen, durch die Fuzzy-Zugehörigkeitswerte erweiterten, Informationsgehalt der Modellergebnisse zeigen. Darüber hinaus ermöglicht es der Verarbeitungsschritt der *Fuzzifizierung*, unabhängig vom Typ und von der Qualität der Daten, weitere Zusatzinformationen in den Klassifikationsprozeß einzubeziehen.

Mögliche Einsatzbereiche derartiger Fuzzy-Systeme bieten sich beispielsweise in Verfahren zur qualitativen Raumbewertung hinsichtlich spezieller Nutzungsfunktionen oder Potentiale (z.B. 'Wohnwertanalysen' oder 'Bodeneignungskarten') an. Die Modellierung von sowohl räumlicher als auch inhaltlicher Unschärfe, wie sie bei jeder Diskretisierung kontinuierlicher Größen auftreten, blieb bisher meist aufgrund fehlender Instrumente unberücksichtigt. Der Einsatz von Fuzzy-Logik-basierten Verfahren könnte hier künftig Abhilfe schaffen.

3.2 Anwendung von Fuzzy-Zahlen und fuzzy-logischen Operatoren mit kompensatorischen Möglichkeiten für Bewertungsprobleme mit GIS

Wilfried Wolf

3.2.1 Stand und Probleme der Nutzung von Fuzzy-Techniken in GIS

Es ist zweifellos Stand der Technik, raumplanerische Modelle mittels GIS zu planen, zu bearbeiten und zu visualisieren. Das hat bei zunehmender gesellschaftlicher und öffentlich-rechtlicher Inwertsetzung planerischer Entscheidungen zu einer Vielzahl von GIS-Produkten geführt, die wegen noch fehlender oder gering entwickelter Modellierungs- und Simulationsfunktionalitäten Anleihe aus anderen Technik- und Wissenschaftsbereichen aufnehmen, um steigenden Erwartungen und Anforderungen gerecht zu werden. Die Unterschiedlichkeit und Vielfalt der hier genutzten methodischen und technologischen Lösungen mündete in dem Bestreben Systematisierungskonzepte zu entwickeln, um eine breite Nutzung möglichst zu erleichtern (vgl. MANDL 1997). Vor dieser Problematik stehen naturgemäß besonders junge, innovative Entwicklungen, wie die Anwendung von Fuzzy-Sets in GIS. Nach Sichtung der Fachliteratur sind zumindest vier Entwicklungstendenzen im gegenwärtigen Prozeß der Zusammenführung von Fuzzy-Techniken mit GIS erkennbar.

Regelbasierte Techniken. Diese umfassen die Erprobung von fuzzy-logischen, regelbasierten Analyseinstrumenten für vorzugsweise Regionalisierungs- respektive Klassifikationsprobleme (MANDL 1995; SCHMIDT 1996) bzw. die Entwicklung von wissensbasierten Geographischen Informationssystemen als offenes Expertensystem auf fuzzy-logischer Grundlage (LEUNG & LEUNG 1993). Im ersteren Fall nutzt man die Tatsache, daß in anderen, zumeist ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen, bereits leistungsfähige Computerprogramme zur Behandlung von Fuzzy-Informationen existieren, die auf spezifische, geographische Problemstellungen anwendbar sind. Ein technologisch abgestimmtes Interface zu Grundfunktionen von GIS existiert hierbei naturgemäß nicht. Eine breite Nutzung ist von daher nicht möglich bzw. durch Schwierigkeiten im Datenaustausch eingeschränkt.

Im zweiten Fall wird mit dem Entwurf eines geographischen Expertensystems auf regelbasierter Basis der Versuch einer vollständig integrierten Verarbeitung von Fuzzy-Informationen in GIS als Zukunftsmodell eingeleitet. Das so konzipierte Expertensystem setzt

unter anderem jedoch aus methodologischer und methodischer Sicht einschränkend voraus, daß die Problemstellung von einem axiomatischen Ansatz her mittels einer Menge von Regeln hinreichend bearbeitbar ist. Im vorstehend genannten Fall impliziert das Konzept noch Entwicklertätigkeit zur Gestaltung der Experten-Shell für die inhaltliche (geographische) Ausrichtung des Systems und ist von daher nicht vergleichbar mit den allgemein üblichen funktionellen und technologischen Standards von GIS. Sein innovativer Ansatz verfolgt eine spezielle Entwicklungsrichtung in der Kombination von GIS-Funktionalität und Expertensystem.

Elementare Operationen mit Fuzzy-Sets. Am häufigsten werden in der geographischen Fachliteratur Anwendungsbeispiele vorgestellt, in denen auf der elementaren Ebene der Fuzzy-Sets mit fuzzy-logischen Operatoren sowie vereinzelt mit der Fuzzy-Arithmetik versucht wird, allgemeine geographische, respektive raumplanerische Problemstellungen, wie z. B. Klassifikation und Regionalisierung, hierarchische Strukturfragen, Lokations- und Allokationsprobleme, u.a.m. beispielhaft zu bearbeiten bzw. traditionelle Verfahren um diese Komponenten zu erweitern. Das schließt im einzelnen auch die Anwendung klassischer multivariater Verfahren unter Einbeziehung von Fuzzy-Maßen ein (fuzzy-basierte Clusteranalyse, Regressionsanalyse, multikriterielle Optimierung). Diesen Anwendungsbeispielen ist das Bemühen gemeinsam, das außerordentlich innovative Potential der Fuzzy-Theorie für spezielle Fragestellungen in der geographischen Forschung und Raumplanung nutzbar zu machen. Die bisherigen Publikationen behandeln diese Verfahren vorrangig in einem mathematischen Kontext. Ihre Anwendung resp. Implementation in GIS bedarf noch erheblicher fachwissenschaftlicher Bemühungen. Als Resümee bleibt die Feststellung, daß eine Aufarbeitung der fuzzy-theoretischen Grundlagen für eine breite und systematische Anwendung in GIS noch zu leisten ist.

Theoretisch-methodische Probleme. Es konnte einerseits mit überzeugenden Beispielen der disziplinäre Gewinn herausgestellt werden, den die Anwendung von Fuzzy-Sets auf typische geographische Untersuchungsfelder, Modelle und Verfahren erbrachte, andererseits wurde deutlich, daß eine Reihe weiterer theoretisch-methodischer Probleme zu Tage traten, die zwangsläufig noch zu bearbeiten sind, wenn bald eine größere Akzeptanz und Anwendungsbreite erreicht werden soll. Das betrifft z. B. die Notwendigkeit, bei bestimmten Verfahrensschritten die Beliebigkeit von individuellen Vorgaben (Mitgliedschaftsfunktionen,

Fuzzy-Operatoren, Wertebereiche von Fuzzy-Sets u.a.m.) durch theoretische Untersuchungen sinnvoll einzuschränken bzw. zu untermauern (MAYER ET AL. 1993; LOWELL & GOLD 1995).

Technologische Probleme. Die bisherige technologische Trennung von Fuzzy-Tools und GIS (Ausnahme: das Bildverarbeitungssystem IDRISI) ist für eine breite Anwendung und Propagierung von Fuzzy-Techniken außerordentlich hinderlich. Hier ist ein deutlicher Problemstau erkennbar, da nahezu alle vorgestellten Fuzzy-Lösungen in speziellen aufgabenspezifisch entwickelten Programmen außerhalb von GIS bearbeitet werden (MANDL 1997).

Die wünschenswerte Implementierung von Fuzzy-Algorithmen in GIS erfordert jedoch in jedem einzelnen Fall eine vertiefte theoretische Auseinandersetzung in der Umsetzung der fuzzy-theoretischen Grundlage für das jeweilige geographisch-methodische Verfahren, um die Interpretationsfähigkeit der Ergebnisse logisch konsistent zu halten. Hier sind erhebliche Vorarbeiten zu leisten, da der gelegentliche GIS-Anwender meist nicht die erforderlichen Vorkenntnisse aus der Fuzzy-Theorie hat bzw. sich vorher aneignen möchte.

Die zwei nachfolgenden Beispiele zeigen die Verwendung von Fuzzy-Sets unter dem Aspekt einer gebietlichen Baueignungsbewertung und ihre Implementation in dem GIS SPANS. Sie sind eindeutig methodisch ausgerichtet und deshalb inhaltlich nur auf die drei Geofaktoren:

- Geologie/Ingenieurgeologie,
- Vegetation/Flächennutzung,
- Lagefaktor als begünstigendes/restriktives Element

beschränkt. Im konkreten Fall wurde auf vorhandenes Datenmaterial aus dem Projekt "Geoökologische Analyse eines Gebietes in Berlin-Buch" zurückgegriffen.[3]

Im ersten Beispiel geht es um einen Modellierungsansatz, bei dem die Unschärfe/Vagheit, mit denen üblicherweise Punktbewertungen für räumliche Bewertungssituationen behaftet sind, durch Fuzzy-Zahlen repräsentiert und in einer "klassischen" Funktion eingesetzt werden. Die räumliche Begrenzung der zu bewertenden Sachverhalte wird in der traditionellen Weise durch Polygone mit scharfen Grenzen behandelt.

[3]Das Projekt wurde am Geographischen Institut , Abt. Geoinformatik/Kartographie der Humboldt Universität zu Berlin im Rahmen einer Arbeitsförderungsmaßnahme (1994-1996) erarbeitet

Im zweiten Beispiel liegt der Schwerpunkt auf der Anwendung eines speziellen Fuzzy-Operators mit kompensatorischem Effekt. Hinzu kommt die Modellierung der räumlichen Wirkung ausgewählter geographischer Objekte auf die gebietliche Baueignung als quasistetiger Verlauf.

Beide Beispiele basieren auf der Anwendung von Fuzzy-Sets auf der Ebene der fuzzy-mathematischen Grundlagen, folgen also dem algorithmischen Ansatz und weichen insofern von den in jüngster Zeit im deutschsprachigen Raum publizierten regelbasierten Anwendungen ab (MANDL 1994,1995; SCHMIDT 1996; REINBERG & BRÖTHALER 1997; BLASCHKE 1997; SYRBE 1993).

3.2.2 Die Verwendung von Fuzzy-Zahlen in einem konventionellen Bewertungsansatz

Das nachfolgende Beispiel einer "potentiellen" Baueignungsbewertung wurde in seiner grundsätzlichen inhaltlichen und methodischen Ausrichtung bereits vorgestellt (vgl. WOLF. 1996), so daß auf eine detaillierte Erörterung hier verzichtet wird. Aus der Sicht der oben ausgeführten allgemeinen Problemlage bei der Anwendung von Fuzzy-Techniken in GIS erscheint es angemessen, ergänzende Ausführungen resp. Kartenbeispiele vorzutragen, in denen die methodische Flexibilität näher vorgestellt wird. Die zum Verständnis erforderlichen fuzzy-mathematischen Grundlagen sind in Kapitel 2.3 zusammengestellt. Bezüglich der einzelnen mathematischen Operationen wird lediglich der theoretische Hintergrund kurz skizziert und ansonsten auf die verwendete Standardliteratur hingewiesen.

Im folgenden Anwendungsfall, einer gewichteten Summation, für die Ermittlung der „potentiellen" Baueignung eines Gebietes, die mittels des GIS SPANS erfolgte, ist

$$I_F = \left(\sum_{i=1..m} g_i * p_{i,F} \right) / \left(\sum_{i=1..m} g_i \right) \qquad (Gl.1)$$

der Bewertungsindex für jede Bewertungsfläche F in der Ergebniskarte. Dieser kennzeichnet die durchschnittliche Bewertungssituation über alle Input-Karten (thematische Schichten) je Flächeneinheit (Ort) als Rangplatz in einer entsprechenden Werteskala. Das Gewicht g_i ist dabei ein Gewicht, mit welchem die i-te Karte in die Bewertung eingeht. Die Punktbewertungen $p_{i,F}$ variieren sowohl nach der Kartennummer i als auch nach der Bewertungsfläche F . Sowohl die Gewichte g_i als auch die Punktbewertungen $p_{i,F}$ sind bei einem konventioneller Ansatz übliche Zahlenwerte, wie eine Punktbewertung von z.B. 4,5; im

Falle von Fuzzy-Zahlen jedoch eine „elastische" Größe resp. Bewertungsspanne, deren unterer Wert und oberer Wert als eine konservative bzw. optimistische Schätzung des zu bewertenden Sachverhalts interpretierbar sind. Die Unschärfe oder Vagheit, die in einer solchen Schätzung liegt, wird durch die entsprechende Zugehörigkeitsfunktion zum Ausdruck gebracht .

Das Bewertungsverfahren ist kurz gesagt eine gewichtete Mittelwertbildung für jede Fläche (Ort) in der Ergebniskarte, in der sowohl die ingenieurgeologische Situation, die Vegetationsart bzw. Flächennutzung als auch die Lage zu Hauptstrassen, S-Bahntrasse, Deponien etc. Berücksichtigung finden.

Das Resultat ist eine Bewertungskarte, in der die Eignung/Nichteignung jeder Fläche unter dem Konzept einer potentiellen Baueignung subsumiert und in einer gestuften Rangfolge ausgewiesen wird (vgl. WOLF, 1996). Die Verwendung von Fuzzy-Zahlen bzw. deren α-Schnitte in der Bewertungsformel ist allerdings kein triviales Problem. Da im Falle der Gewichte die Werte positiv und die Punktwerte nicht negativ sind, kann die gewichtete Summation als eine stetige Abbildung betrachtet werden, die auf kompakte und verbundene Intervalle angewandt wieder ein kompaktes und verbundenes Intervall auf dem selben α-Level ergibt. Das Ergebnisintervall umfaßt also die Menge der Werte I_{F_α}, bei denen der Zugehörigkeits-/Möglichkeitswert $\geq \alpha$ ist.

In der praktischen Anwendung und für die inhaltliche Intepretation ist es entscheidend, eine Methode zu haben, nach der die Anfangs- und Endwerte des Ergebnisintervalls resp. der Bewertungsspanne für ein beliebiges α zu ermitteln sind. Das kann nach folgender Vorschrift geschehen:[4]

$$\min \underline{I}_{F_\alpha} = \min f\,[\mathrm{Mix}\,(g_{1_\alpha}),\ldots \mathrm{Mix}\,(g_{m_\alpha}),\ \mathrm{Min}\,(p_{1_\alpha}),\ldots \mathrm{Min}\,(p_{m_\alpha})]$$

$$\max \underline{I}_{F_\alpha} = \max f\,[\mathrm{Mix}\,(g_{1_\alpha}),\ldots \mathrm{Mix}\,(g_{m_\alpha}),\ \mathrm{Max}\,(p_{1_\alpha}),\ldots \mathrm{Min}\,(p_{m_\alpha})]$$

mit :

$$\mathrm{Mix}\,(g_{i_\alpha}) = \{\min g_{i\,\alpha},\ \max g_{i\,\alpha}\}$$

$$\mathrm{Min}\,(p_{i_\alpha}) = \{\min p_{i\,\alpha}\}$$

$$\mathrm{Max}\,(p_{i_\alpha}) = \{\max p_{i\,\alpha}\}$$

[4] Der Berechnungsalgorithmus wurde von P. Schrader, ehem. Mitarbeiter am Institut, erstellt.

Dabei hat das Argument des gewichteten Summenoperators 'f' Mengen mit zwei bzw. einem Element, das Ergebnis der Operation, der Bewertungsindex $\underline{I}_{F_\alpha}$, hingegen maximal 2^m Elemente, mit „m" gleich Anzahl der Inputkarten/ thematische Layer, die in die Bewertung einfließen.

Abschließend sei bemerkt, daß der in der SPANS-eigenen Modellierungssprache geschriebene Algorithmus die vier möglichen Kombinationen zwischen Punkt- und Gewichtsbewertungen mit konventionellen oder unscharfen Daten umfaßt und so einen zusätzlichen Gestaltungsspielraum für unterschiedliche Bewertungsansätze schafft.

3.2.3 Bewertungsbeispiele mit unscharfen Punkt- und Gewichtungszahlen

Die nachfolgenden Abbildungen (3.2-3 bis 3.2-5) sind vordergründig als Demonstrationsbeispiele der methodischen Flexibilität des Verfahrens im Vergleich zum konventionellen Ansatz gedacht.

Bei einem solchen Vergleich sollte man sich vergegenwärtigen, daß die Fuzzy-Bewertungen weder „besser" noch „schlechter" oder „wahrer" sein können. Sie bilden lediglich jenen entscheidenden Aspekt ab, der darin begründet liegt, daß hierbei jede Eignungsbewertung schon vom Ansatz her sich mit schwer abgrenzbaren, inhaltlich und räumlich unscharfen Objekten und Phänomenen auseinandersetzen muß, die sich letztlich in einer subjektiven Präferenzierung bricht. Das kann auf konventionellen Weise geschehen, indem die „Verengung" auf einen Wert, eine Gewichtung, eine Grenzlinie etc. bereits in einer Anfangsphase erfolgt, wobei die nachfolgenden Datenaggregationen und Verknüpfungen eben nur diesen einen Wert aus einem denkbaren und akzeptablen Wertespektrum berücksichtigen. Der alternative Ansatz bildet hingegen die Unschärfe/ Vagheit des Bewertungsansatzes in den Fuzzy-Sets ab, macht sie damit für den Bewertungsalgorithmus operationabel, und stellt wieder eine Ergebnismenge (Fuzzy-Set) zur Verfügung. Auf dieser läßt sich mittels der α-Schnitte in beliebigem Umfang recherchieren, um verschiedene Zielstellungen/ Bewertungsaspekte und dergleichen mehr in ihren räumlichen Konsequenzen zu vergleichen.

Abbildung 3.2-1 bildet das Untersuchungsgebiet (ca. 7,3 km²) in der nördlichen Stadtrandzone Berlins im Grenzbereich zum Land Brandenburg ab. Das Gebiet ist sowohl morphologisch, geologisch als auch geohydrologisch sehr unterschiedlich gestaltet und hat die

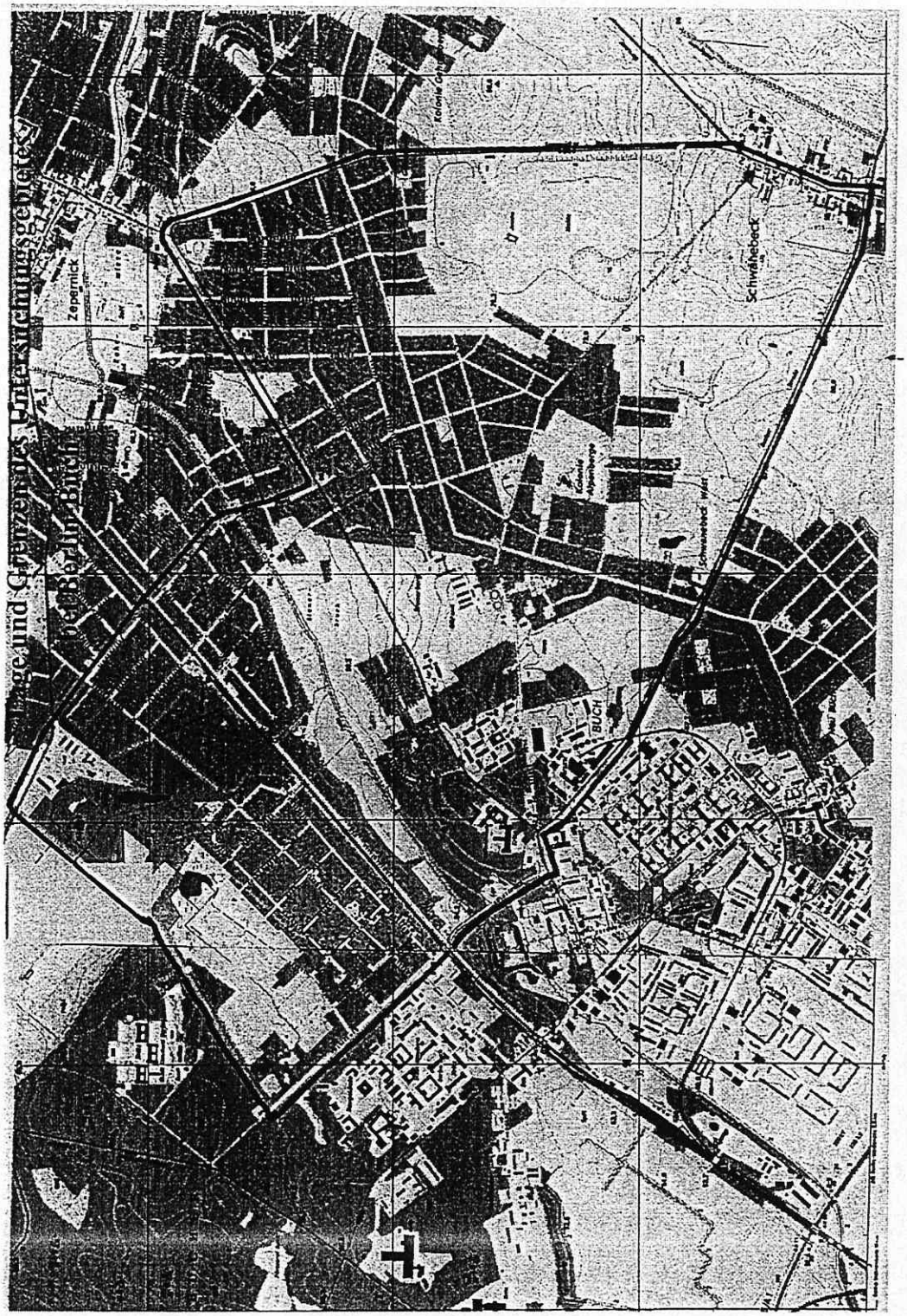


Abb. 3.2-1: Lage und Grenzen des Untersuchungsgebietes Berlin Buch

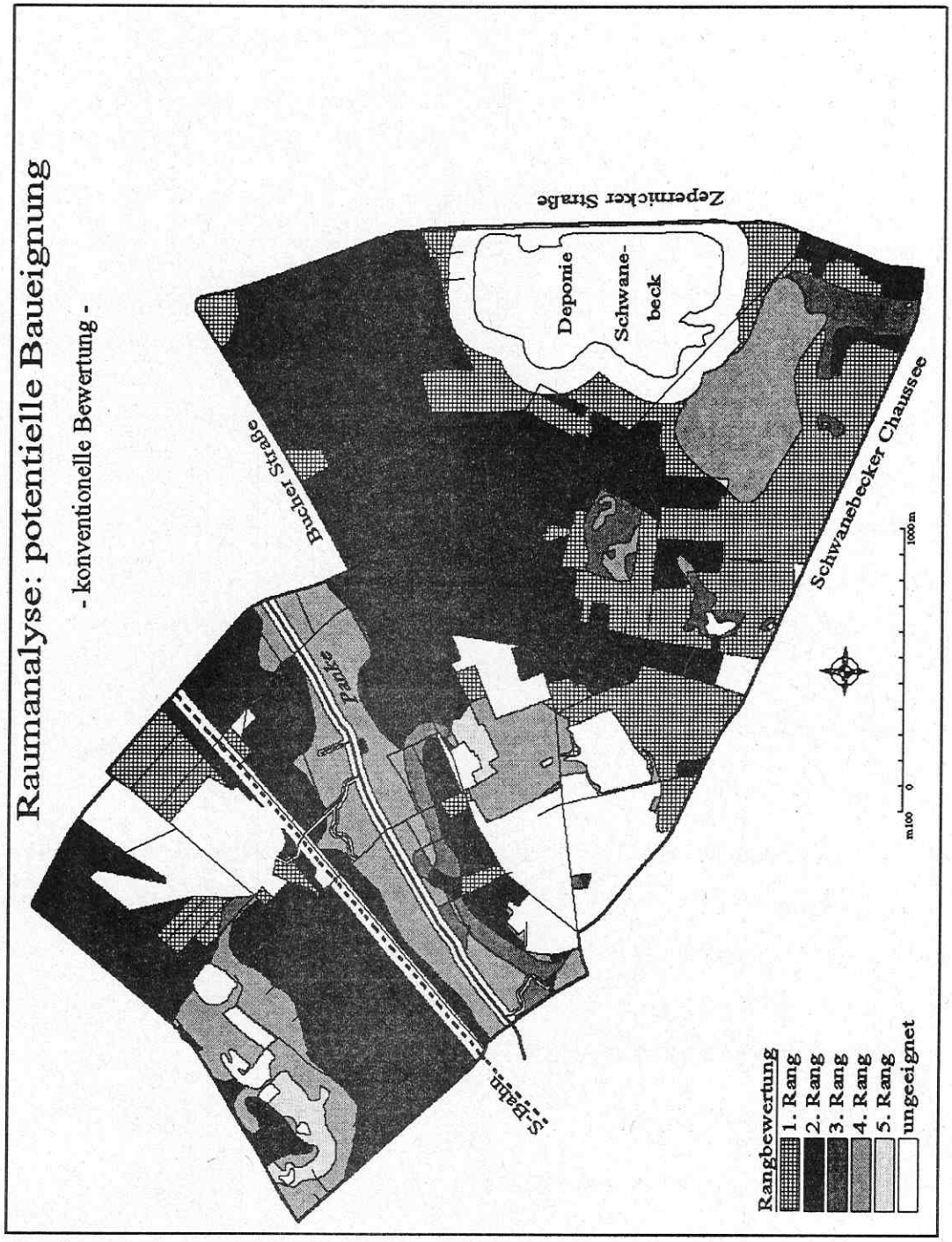


Abb. 3.2-2: Raumanalyse: potentielle Baueignung (konventionelle Bewertung)

für Stadtrandzonen typischen Konfliktbereiche zwischen urbaner und ländlicher Nutzung bzw. Überprägung. Bezogen auf die „potentielle" Baueignungsbewertung nach den oben genannten Kriterien, wird diese Grundsituation bereits im konventionellen Bewertungsansatz (Abbildung 3.2-2) in Form von Eignungsrängen sichtbar.

Die Abbildung 3.2-3 und 3.2-4 zeigen die räumliche Variation in einer Bewertung, bei der jeweils mit den „optimistischen" resp. „"konservativen" Punkt/ Gewichtsbewertungen die Berechnung durchführt wurde. Diese ergeben sich aus den Intervallendpunkten der Bewertungsspanne, die bei dem gewählten $\alpha = 0.85$ aus der jeweiligen Fuzzy-Zahl konstruiert wird. Im Vergleich beider Bewertungsansätze werden nicht nur Unterschiede in der Anzahl der Ränge deutlich, sondern es werden zusätzliche Flächenstrukturen sichtbar. Mit anderen Worten, es erfolgt keineswegs nur eine Rangverschiebung oder Zusammenlegung von dem in der konventionellen Bewertung (Abbildung 3.2-2) ausgewiesenen Flächenmuster.

Die Abbildung 3.2-5 bezieht sich auf die Abbildung 3.2-3 und 3.2-4 dergestalt, daß in ihr eine Grundidee der Anwendung von Fuzzy-Methoden zum Ausdruck kommt. Fuzzy-Methoden haben potentiell die Wirkung, daß die Bewertungsunterschiede der Input- Daten im Verfahrensgang nicht eliminiert werden. Sie sind hier in Form von Rangdifferenzen für ein und den selben Ort verdeutlicht und können wesentliche Anhaltspunkte bieten, wo genau bezüglich der einzelnen Sachverhalte die Bewertungen mit den größten Unsicherheiten/Unschärfen behaftet sind bzw. wo das Risiko von Fehlbewertungen am größten ist.

Abbildung 3.2-6 illustriert das Ergebnis eines Vergleichs zwischen einer konventionellen Bewertung und einer Fuzzy-Bewertung für eine beliebige Rangstufe, hier bezogen auf den Rang 1 mit der entsprechenden „optimistischen" Bewertung. Im Falle eines weiteren oder alternativen Flächenbedarfs bietet ein solcher Vergleich entsprechende Anhaltspunkte bzw. einen größeren Entscheidungsspielraum.

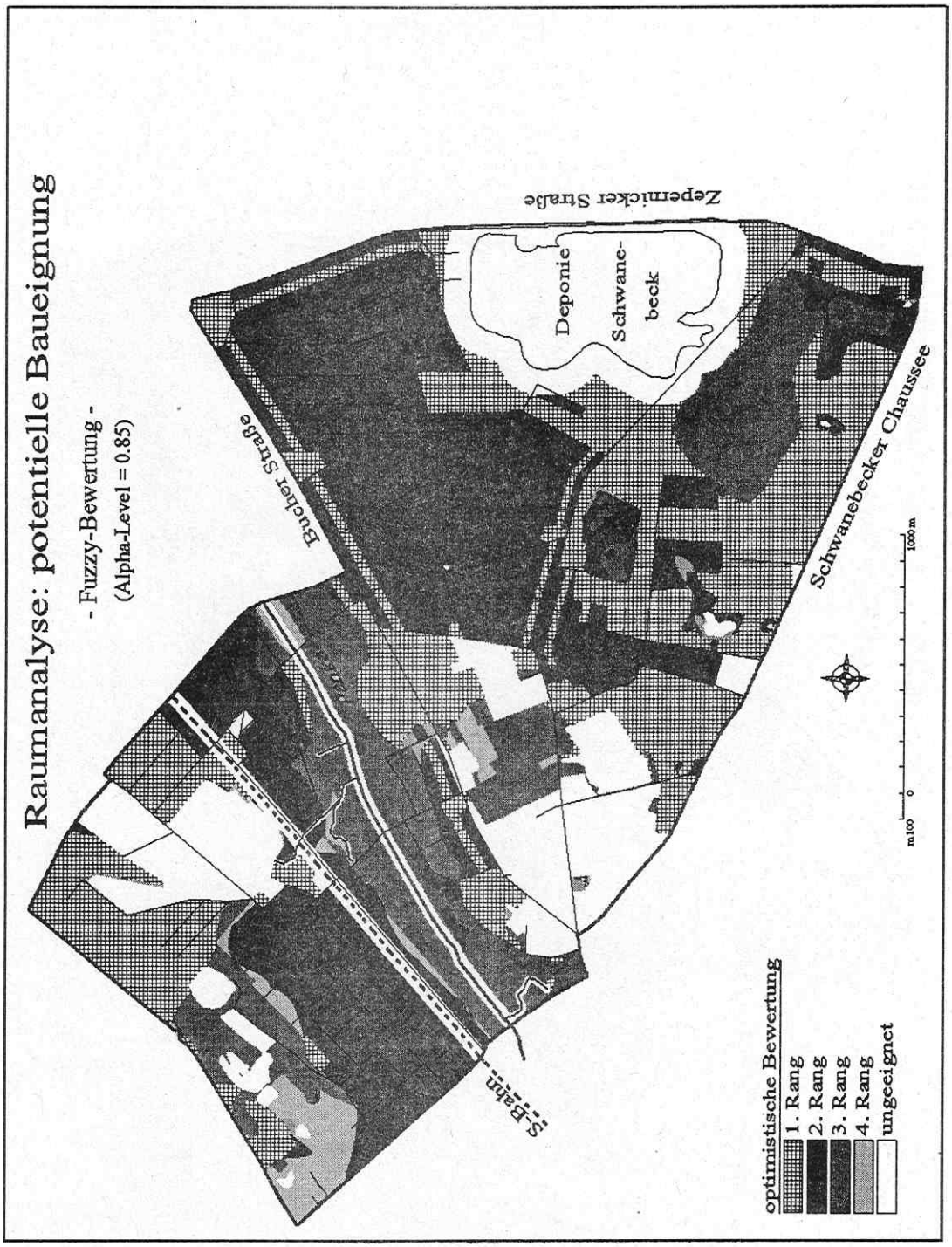


Abb. 3.2-3: Raumanalyse: potentielle Baueignung (Fuzzy-Bewertung mit Alpha-Level = 0,85, optimistische Bewertung)

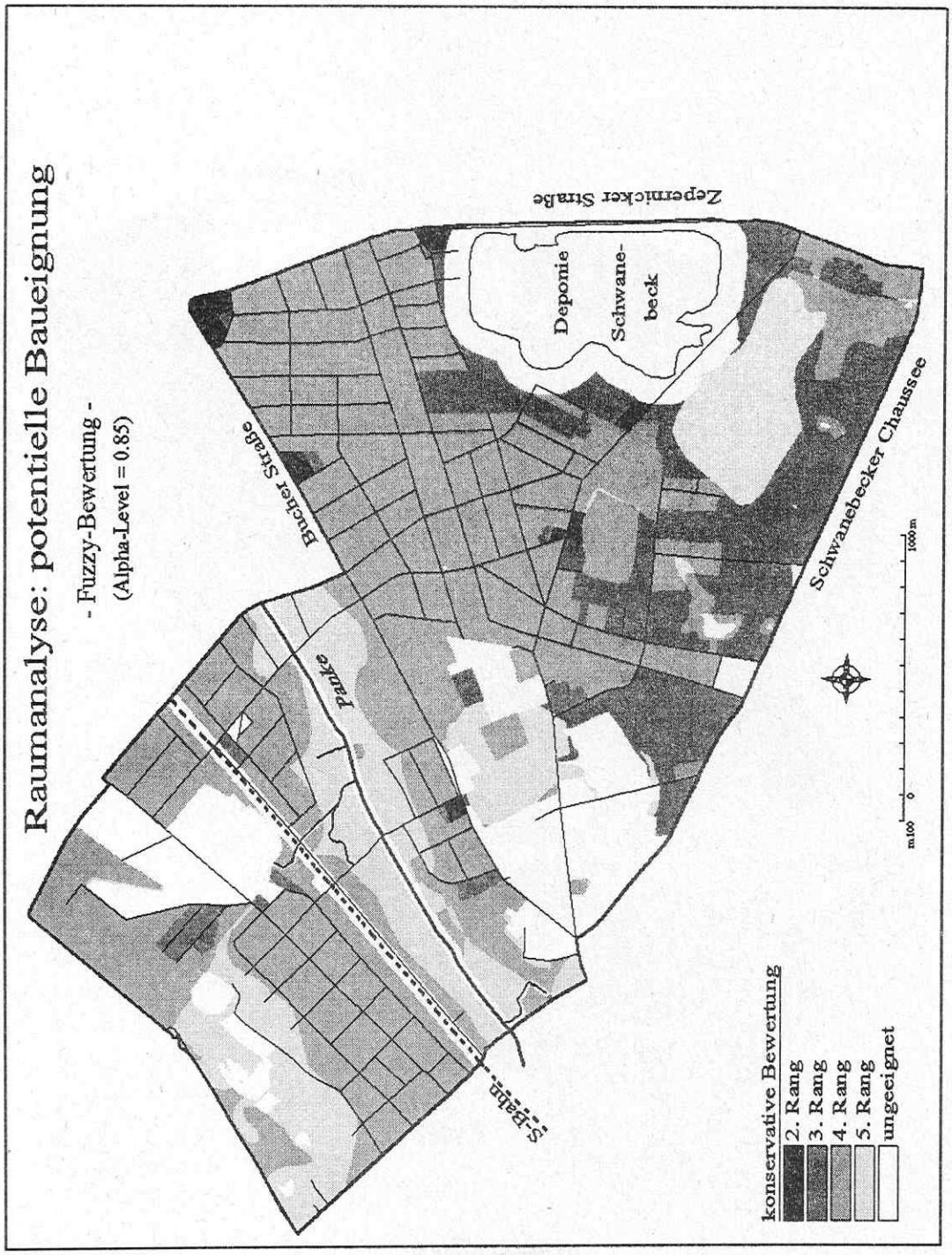


Abb. 3.2-4: Raumanalyse: potentielle Baueignung (Fuzzy-Bewertung mit Alpha-Level = 0,85, konservative Bewertung)

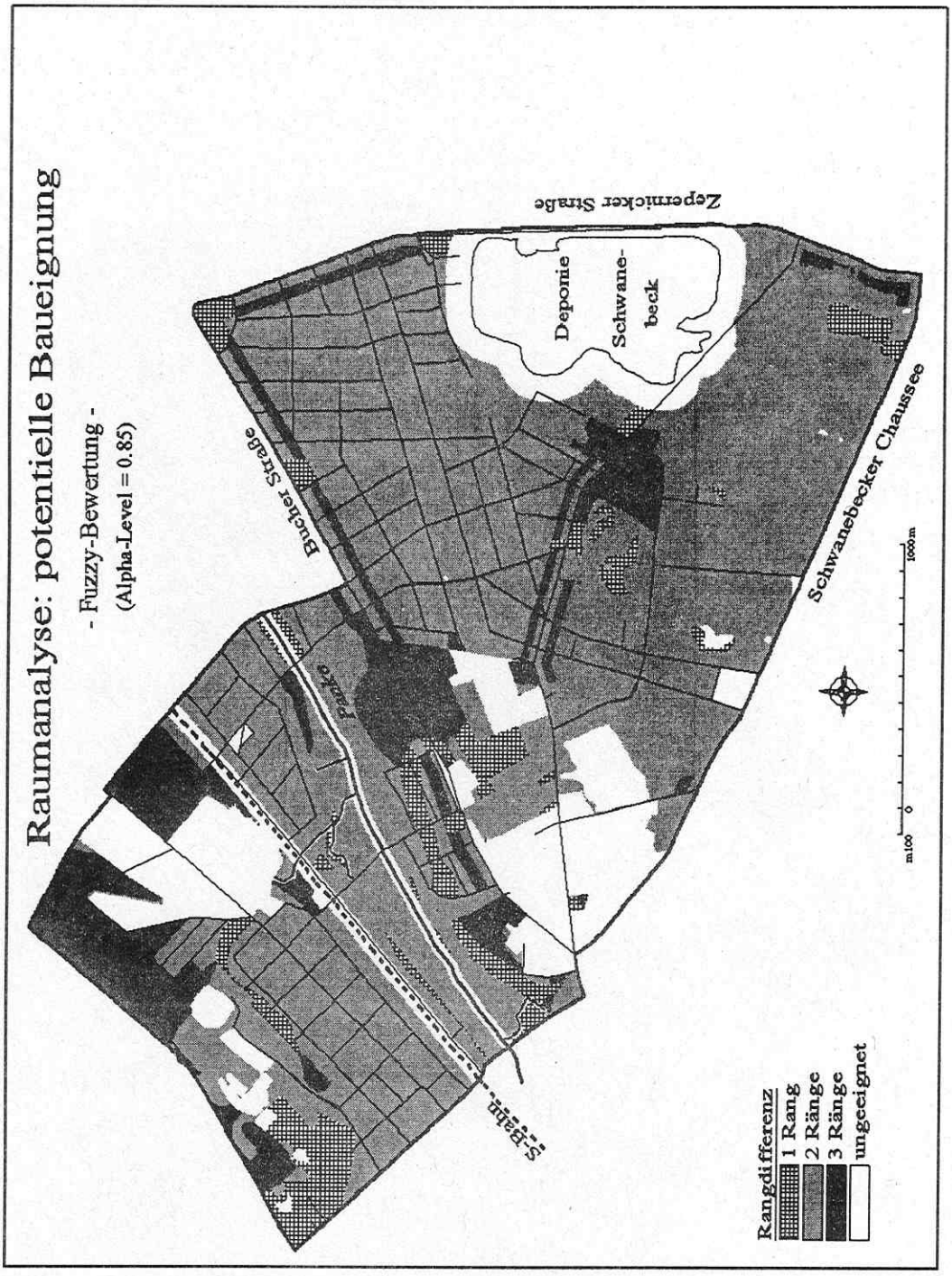


Abb. 3.2-5: Raumanalyse: potentielle Baueignung (Fuzzy-Bewertung mit Alpha-Level = 0,85, Rangdifferenz)

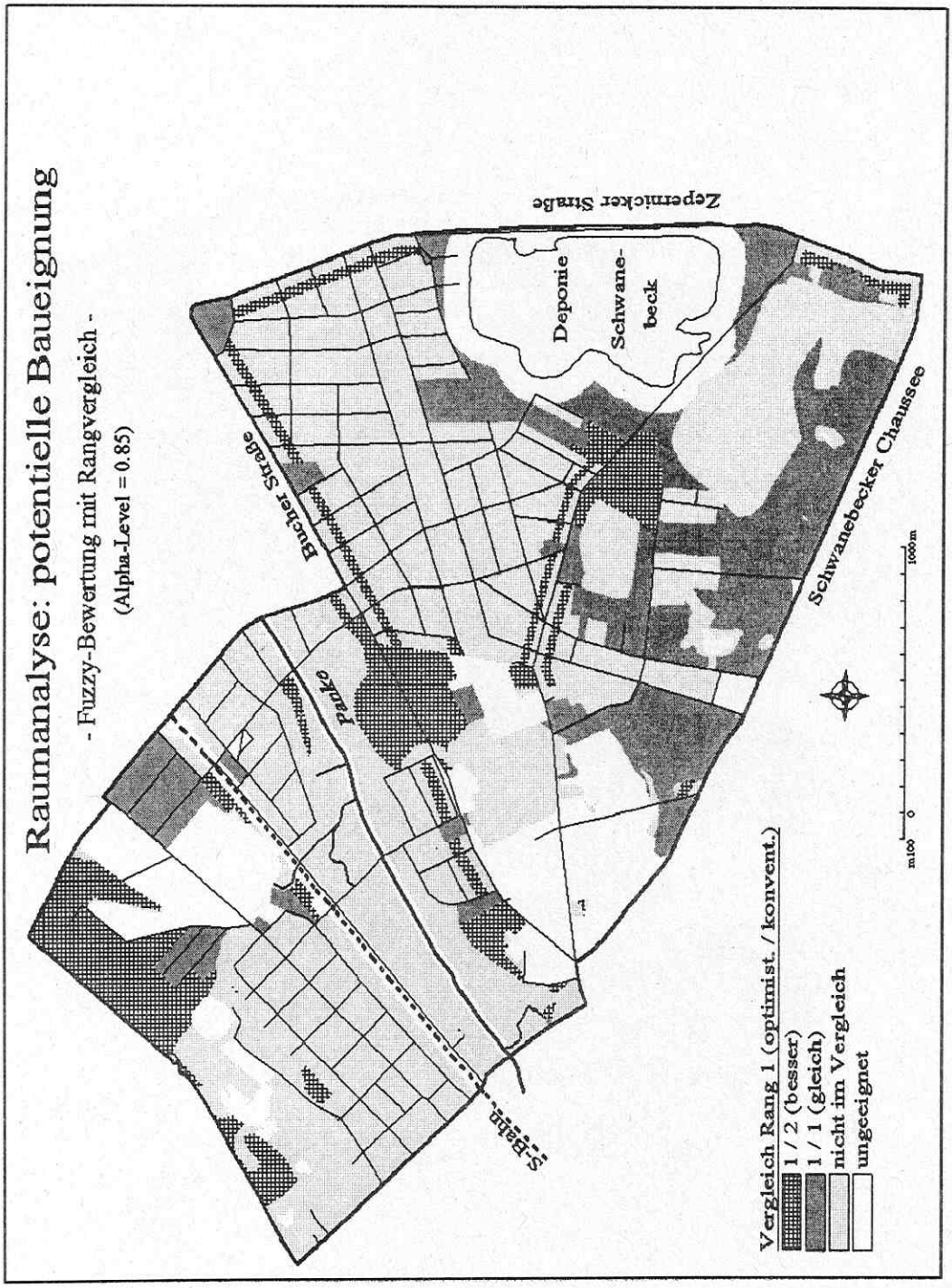


Abb. 3.2-6: Raumanalyse: potentielle Baueignung (Fuzzy-Bewertung mit Rangvergleich, Alpha-Level = 0,85)

3.2.4 Die Verwendung eines fuzzy-logischen Verknüpfungsoperators

Der nachfolgende methodische Ansatz zeigt eine Möglichkeit, wie Sachinformationen mit Lagegunst (Präferenz) resp. Lageungunst (Restriktion) als räumliche Eigenschaften verknüpft und in GIS modelliert werden können. Damit kommt die Modellierung von räumlich fließenden Übergängen/Unschärfen auf eine konkrete Bewertungssituation zur Anwendung. Als Eingangsinformationen liegen aus fachspezifischer Sicht gewertete Baueignungsgrade (Fuzzy-Sets) zur Ingenieurgeologie, zur Vegetation bzw. Flächennutzung (Sachinformation) in Form diskreter Werten vor. Bei der Behandlung von Präferenzen (Lagegunst bei Nähe zu Hauptstraßen) sowie Restriktionen (Zonen um Deponien, entlang einer S-Bahntrasse und dem Fluß Panke) wurde ein Modell (Zugehörigkeitsfunktion) unterstellt, bei dem der Präferenz- bzw. Restriktionseffekt mit zunehmender Entfernung in nichtlinearer Weise abnimmt (vgl. Abbildung 3.2-7).

Die Methodik zur Auswahl potentiell geeigneter Flächen für Bebauungsmaßnahmen fußt auf Verknüpfungsregeln von Fuzzy-Mengen. Die Grundoperationen sind "UND"- (algebraisches Produkt) bzw. "ODER"- (algebraische Summe) Verknüpfungen. Bei einer "UND"-Verknüpfung richtet sich das Ergebnis, vereinfacht gesagt, nach dem kleinsten Eignungsgrad, der für das Objekt (Fläche) vergeben wurde. Dagegen ergibt die "ODER"-Verknüpfung ein Ergebnis, das sich nach dem besten Eignungsgrad richtet. Jede dieser Operationen liefert aber für sich genommen bei einer Eignungsanalyse im allgemeinen unbefriedigende Ergebnisse.

Die nachfolgend vorgestellte Kompensationsmethode aus dem Gebiet der Fuzzy-Logik, die im GIS SPANS zur Anwendung kam, gestattet in der Gesamtbewertung einen Ausgleich zwischen den unterschiedlichen Eignungsgraden aus den Sach- und Lageinformationen. Damit besteht die Möglichkeit auch dann noch ein Ergebnis zu erlangen, wenn es keine Daten gibt, die präzise mit den gesuchten bzw. gewünschten Kriterien übereinstimmen.

Die Stärke dieses Effekts läßt sich beliebig zwischen keiner ("UND"-Verknüpfung bei $\gamma=0$) und voller Kompensation ("ODER"-Verknüpfung bei $\gamma=1$) regeln.

Die mathematische Grundlage dieser Kompensationsmethode ist der Gammaoperator:

$$\mu(x) = [\prod_{i=1}^{m} \mu_i(x)^{\delta_i}]^{1-\gamma} \cdot [1 - \prod_{i=1}^{m}(1 - \mu_i(x))^{\delta_i}]^{\gamma}$$

$$\text{mit } 0 \leq \gamma \leq 1 \text{ und } \sum_{i=1}^{m} \delta_i = 1.$$

Die Einführung von Gewichtungsoperatoren δ_i für die Eignungsgrade (Fuzzy-Sets) jeder Input-Map ermöglicht eine zusätzliche Feinabstimmung in der Bewertung.

Abschließend ist zu bemerken, daß dieser Kompensationsansatz zugleich ein wesenseigenes Element der Fuzzy-Logik veranschaulicht. Im Gegensatz zur klassischen Logik wird die "UND"- und "ODER"- Regel nur partiell aktiviert, quasiparallel abgearbeitet und in einem gemeinsamen (kompensatorischen) Ergebnis zusammengeführt.

Erläuterungen zu den Abbildungen:

Abbildung 3.2-7 veranschaulicht die potentielle Baueignung eines Gebietsausschnitts unter dem Aspekt einer Restriktion. Das Modell geht von der Annahme aus, daß die Baueignung in unmittelbarer Nachbarschaft von S-Bahntrasse und Panke am geringsten ist und daß diese angenommene Restriktionswirkung mit zunehmender Entfernung stetig aber nicht linear abnimmt und schließlich endet.

Die Baueignungswerte, die hier als "Höhenwerte" die Z-Achse bilden, beschreiben für jede Flächenposition den Zugehörigkeitsgrad zum Bewertungsziel "potentielle Baueignung". Die eigentliche topographische Situation ist hierbei unbeachtlich.

Die Abbildung 3.2-8 illustriert die kompensatorische Wirkung des Gammaoperators in seinem Differenzierungsvermögen bei der Bewertung der potentiellen Baueignung. Die verschiedenen Graustufen lassen die unterschiedliche Eignungsbewertung über größere Teile des Untersuchungsgebiets erkennen, die je nach Einsatz des kompensatorischen Effekts Bewertungsunterschiede hervortreten läßt.

Die Abbildung 3.2-9 ist ein spezielles Demonstrationsbeispiel der räumlichen Verknüpfung des Restriktions- resp. Präferenzmodells mit den Sachinformationen, dargestellt in einem Gebietsausschnitt (vgl. Abbildung 3.2-7).

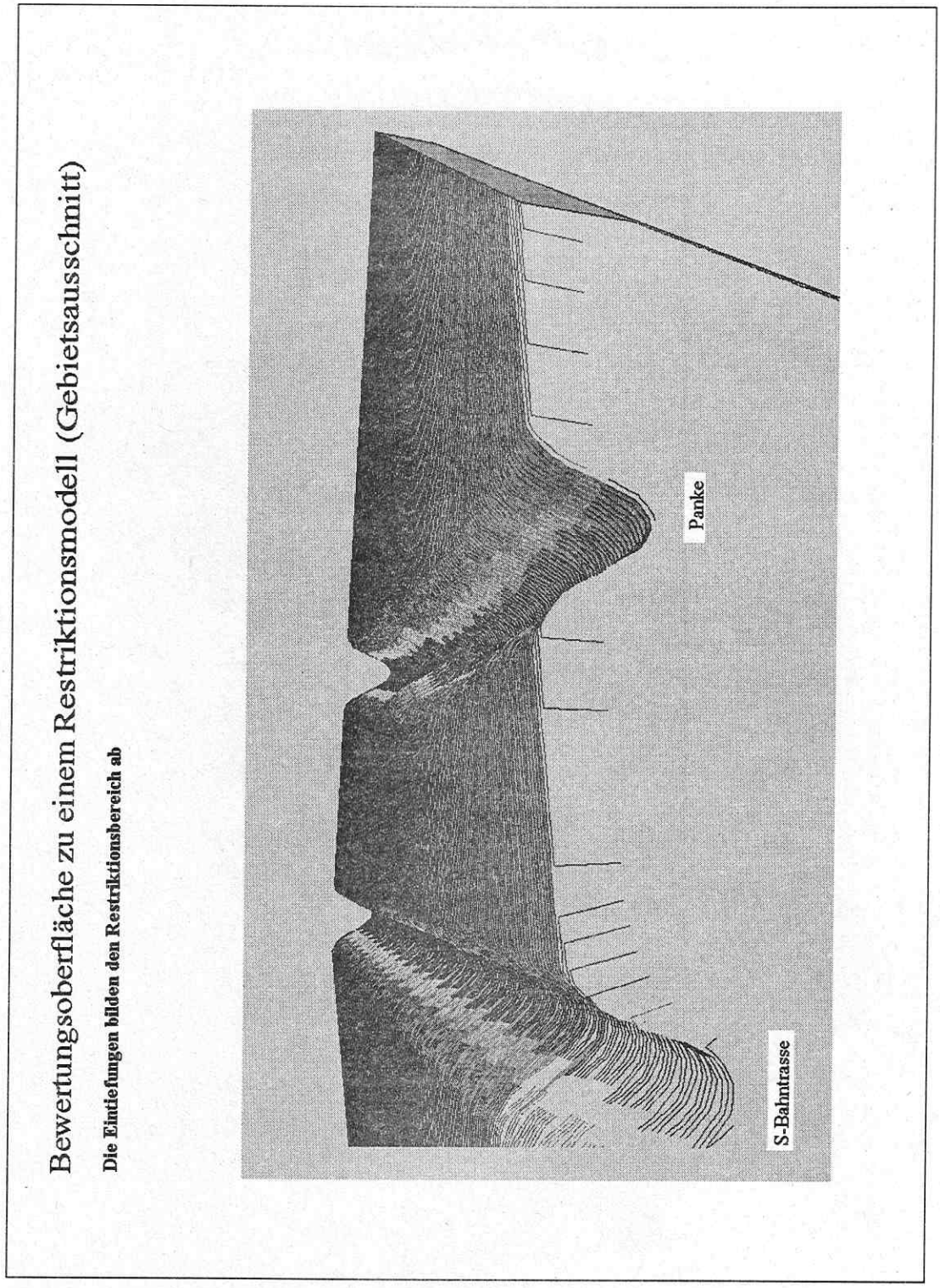


Abb. 3.2-7: Bewertungsoberfläche zu einem Restriktionsmodell (Gebietsausschnitt)

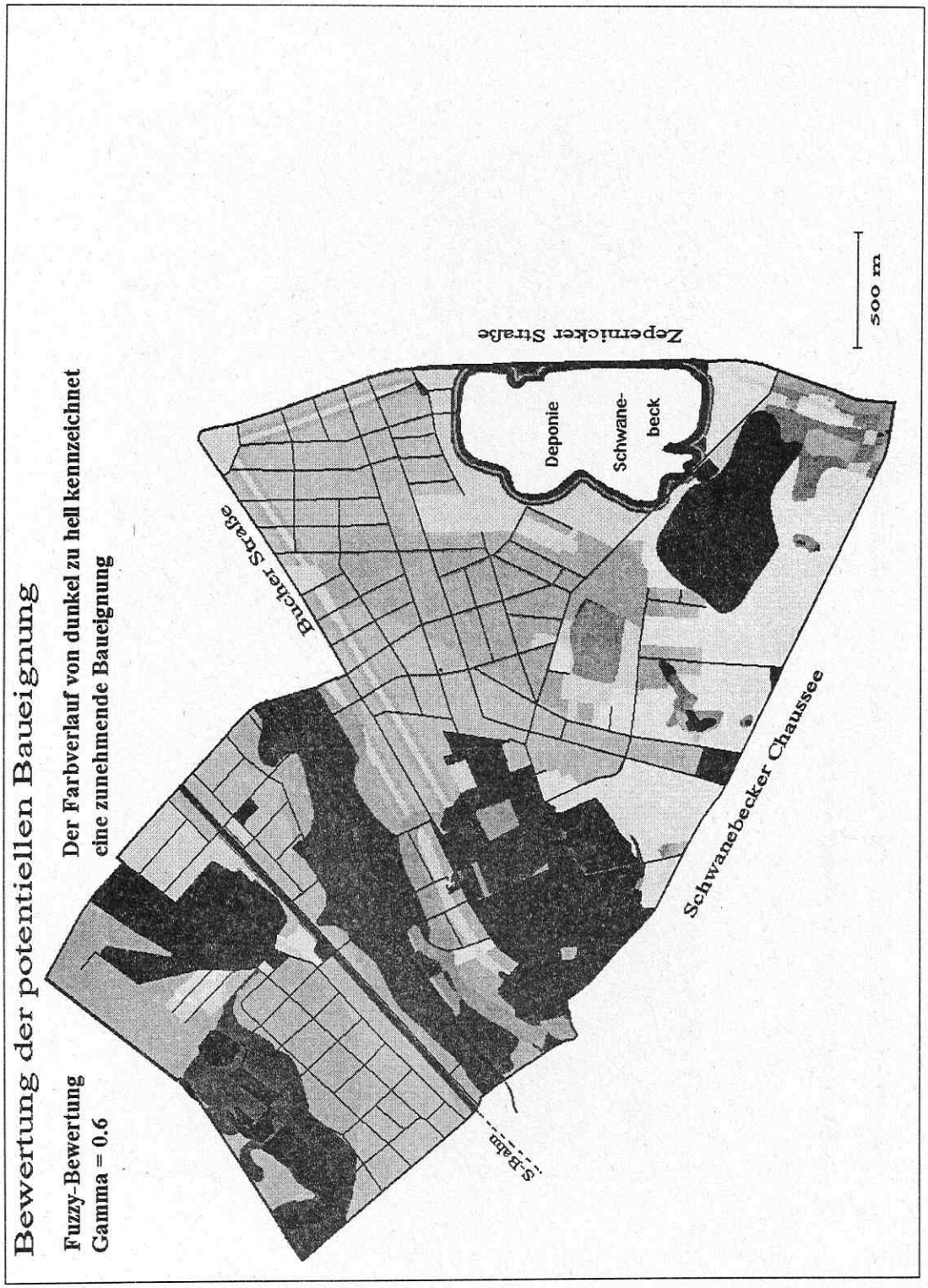


Abb. 3.2-8: Bewertung der potentiellen Baueignung (Fuzzy-Bewertung, Gamma = 0,6)

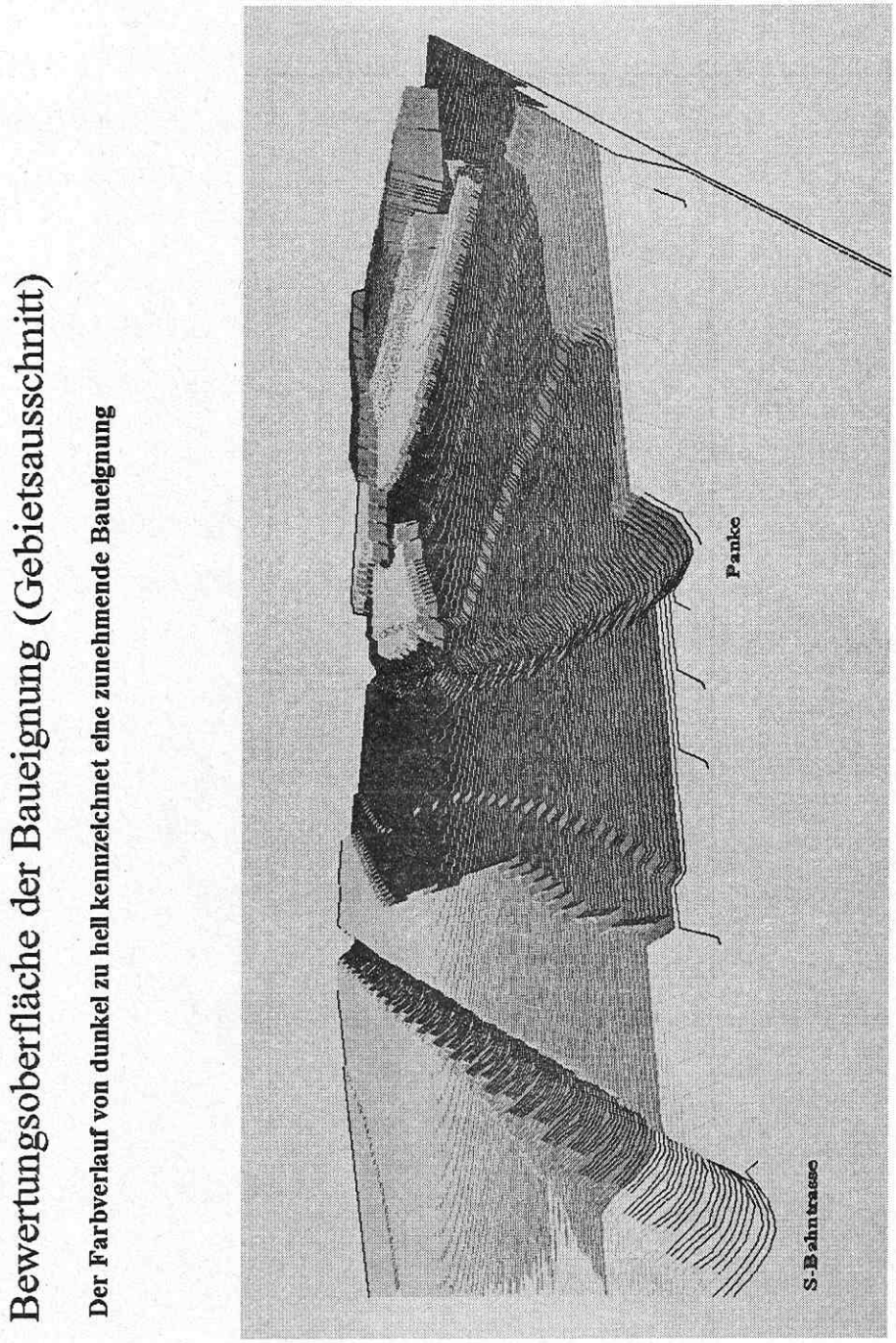


Abb. 3.2-9: Bewertungsoberfläche der Baueignung (Gebietsausschnitt)

Hier wird anhand der unterschiedlichen Eintiefung von S-Bahntrasse und Panke die Modellierung des räumlichen Übergangs der Restriktion in die Bewertungsfläche der Sachinformationen sichtbar. Da die kompensatorische Bewertung von Ingenieurgeologie und Flächennutzung entlang der Panke niedriger ist als beiderseits der S-Bahntrasse, greift hier die räumliche Wirkung des Restriktionsmodells kürzer.

Abbildung 3.2-10 veranschaulicht das in der Fuzzy-Theorie gebräuchliche Verfahren der Defuzzifizierung durch α-Schnitte , das heißt die Auswahl eines geeigneten Wertes oder Wertebereiches aus der Ergebnismenge der μ-Werte (zwischen 0 und 1). Im vorliegenden Fall werden jene Flächen sichtbar gemacht, deren $\mu \geq 0.85$ ist.

Die analytische Flexibilität dieses Verfahrens ermöglicht dem Planer unter ganz unterschiedlichen Aspekten, wie z.B. ökologischen, ökonomischen, qualitativen und/oder quantitativen Flächenanforderungen räumlich zu recherchieren.

Wem das Paradigma der Fuzzy-Theorie, gestützt auf mathematische und logische Konstruktionen zu abstrakt entgegentritt, mag vielleicht an dem feinsinnig formulierten Erklärungsansatz von HOWARD GARDNER Gefallen finden.

„Die Computer zwangen den Menschen, seinen Glauben an die Exaktheit der Begriffe und Definitionen ernst zu nehmen, und als der Mensch sich auf die Suche nach diesen exakt definierten Begriffen und ihren scharf gezogenen Grenzen machte, stellte er fest, daß sie nicht existieren und noch nie existiert haben." (MCNEILL & FREIBERGER, S. 144)

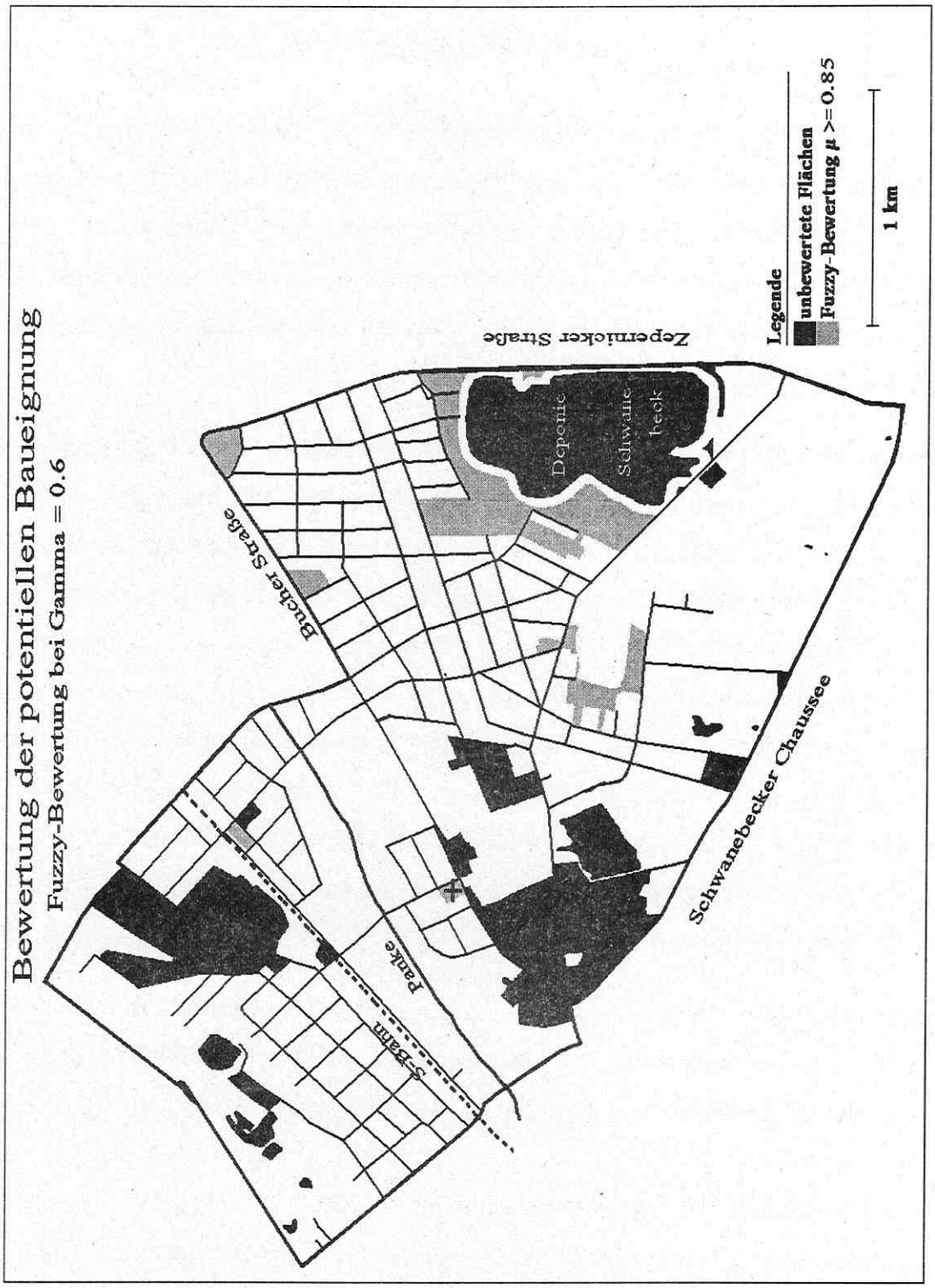


Abb. 3.2-10: Bewertung der potentiellen Baueignung (Fuzzy-Bewertung, Gamma = 0,6)

3.3 Einsatz von neuronalen Netzen und Fuzzy-Systemen bei der Habitatmodellierung als Teil einer Landschaftsmodellierung

Ralf Wieland

3.3.1 Einleitung und Zielstellung

Als Ziel steht die Entwicklung eines Habitatmodells für die Tierarten Schleiereule, Kranich, Rotbauchunke und Großtrappe. Das Modell stellt eine Gütefunktion des Habitats dar, die es erlaubt, eine Abschätzung der Folgen veränderter Landnutzung (Agrarsektor, Tourismus, Verkehr usw.) vorzunehmen. Die räumlichen Maßstäbe orientieren sich am konkreten Habitat, die Auswertung erfolgt mit Hilfe eines geographischen Informationssystems für die Untersuchungsräume.

Habitatmodelle sollen im Unterschied zu Populationsmodellen in der Landschaftsplanung genutzt werden, sie erfassen demzufolge den Charakter der Landschaft und zielen nicht in erster Linie auf die Erhaltung einer bestimmten Tierart Eingriffe in die Landschaft, verursacht durch eine geänderte Landnutzung z.B. in der Landwirtschaft führt zwangsweise zu einer geänderten Habitatstruktur. D.h. bestimmte Tiere oder Pflanzen werden verschlechterte Bedingungen vorfinden, andere aber auch verbesserte. Das führt zu einer sukzessiven Änderung der einheimischen Flora und Fauna. Geht man von einer gewünschten Struktur der Flora und Fauna als Umweltqualtätsziel aus, so sollten notwendige Eingriffe in die Landnutzung so gestaltet werden, daß sich die Lebensbedingungen der gewünschten Pflanzen und Tiere möglichst nur wenig verschlechtern. Diesem Ziel entsprechend gilt es, durch Modelle die langfristigen Wirkungen der Eingriffe in die Landschaft vorhersagbar zu machen.

Diese Modelle müssen ein recht komplexes Spektrum von Umweltansprüchen unterschiedlicher Zieltierarten widerspiegeln. Die Erforschung spezifischer Umweltansprüche einzelner Tierarten ist aber in den meisten Fällen noch Gegenstand aktueller biologischer Forschung, d.h. die Modelle sind parallel zur laufenden Forschung gemeinsam mit den Biologen zu entwickeln. Aus dieser Tatsache ergeben sich folgenden Konsequenzen:

- Die Modelle müssen flexibel an neue Forschungsergebnisse anpassbar sein.
- Die Modelle müssen vom Biologen interpretierbar sein.

Diese Forderungen führen zu einer verstärkten Hinwendung zu Methoden der künstlichen Intelligenz, sprich Fuzzy-Methoden und Neuronalen Netzen. Im weiteren werden diese Methoden diskutiert und ihr praktischer Einsatz vorgestellt.

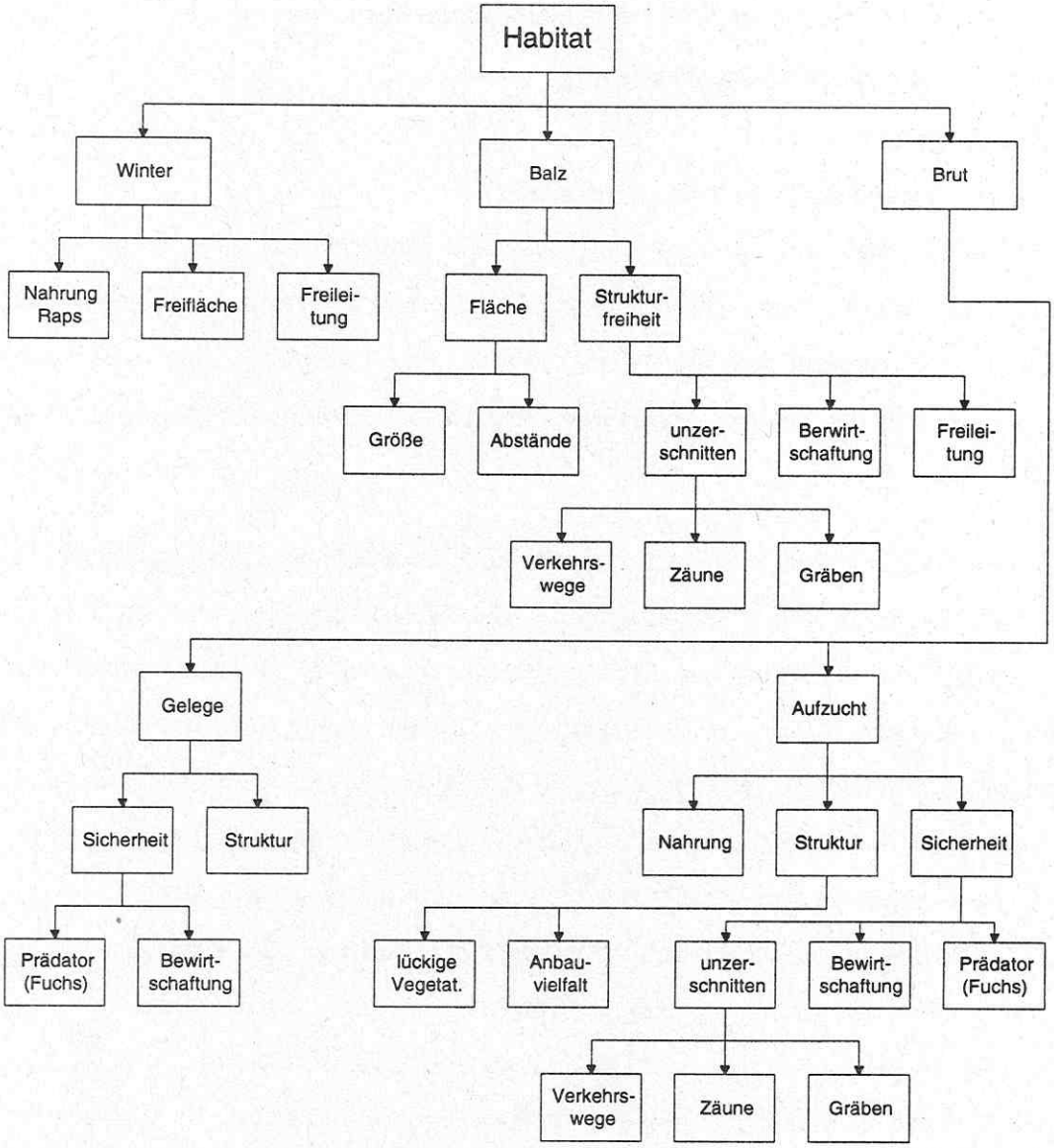


Abb. 3.3-1: Hierarchie des Großtrappenhabitats

3.3.2 Modellierungsstrategie

Als Habitat bezeichnet man in der Ökologie den Ort, an dem ein Organismus einer Art regelmäßig anzutreffen ist. Diese Definition weist ein Habitat selbst als einen hochaggregierten Begriff aus, der sich aus verschiedenen Faktoren zusammensetzt, die selbst wieder aggregiert

sein können. Diese Faktoren bilden eine Hierarchie, an deren Blättern elementare Faktoren stehen, die direkt meßbar bzw. einfach bewertbar sind. So setzt sich das Habitat der Schleiereule aus den aggregierten Faktoren: Fortpflanzungsbedingungen *fortpf*, Nahrungsbedingungen *nahr*, und dem Gefährdungspotential *gefahr*, zusammen. Die Fortpflanzungsbedingungen spalten sich in die Faktoren des Nistplatzes und des Tageseinstandes auf. Diese Faktoren wiederum können auf die nun elementaren Faktoren:

- Schallbelastung am Nistplatz (Einstand);
- Schutz vor Feinden und
- Baulicher Zustand des Nistplatzes (Einstandes)

zurückgeführt werden. Bemerkt werden soll, daß die Schleiereule als Kulturfolger, vorwiegend Bauwerke, wie Kirchen, Trafohäuschen u.ä. besiedelt. Mit Hilfe des Biologen, der in unserer Strategie als Experte fungiert, ist es möglich, eine komplette Hierarchie eines Habitates aufzubauen. Für die Schleiereule ist eine vereinfachte Struktur in Abbildung 3.3-2 gezeigt.

Diese Hierarchie bildet den ersten Schritt für die Erstellung des künftigen Habitatmodells. Die hierin enthalten Faktoren auf unterer Ebene können durch Messungen oder durch elementare Bewertungen quantifiziert werden. In der hier vorgestellten Konzeption wird einheitlich von einer Skalierung zwischen [0.0 ... 1.0] ausgegangen. Dabei stehen niedrige Werte für schlechte Bedingungen und Werte nahe 1.0 für gute Bedingungen. Der durch die Bewertung eingebrachte subjektive Anteil wird durch entsprechende Untersuchungen vor Ort, minimiert. So werden z.B. bevorzugte Jagdgebiete der Schleiereule, Entfernungen usw. durch telemetrische Untersuchungen bestimmt. Wesentlich schwieriger gestaltet sich die 'Verrechnung' der Faktoren zu einer Bewertung höheraggregierter Faktoren bis hin zur Habitatgüte als Gesamtbewertung. Für diese Aggregation wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Der Fuzzy-Ansatz trägt der Situation Rechnung, daß der Experte in der Lage ist, die Wirkzusammenhänge linguistisch zu beschreiben, genaue qualitative Abhängigkeiten aber nicht verfügbar sind. Der Ansatz, der mit den Neuronalen Netzen verfolgt wird, hilft in den Situationen, in denen zwar Beispiele guter oder auch weniger guter Faktoren bekannt sind, die Zusammenhänge aber auch nicht einmal linguistisch hinreichend genau beschreibbar wären.

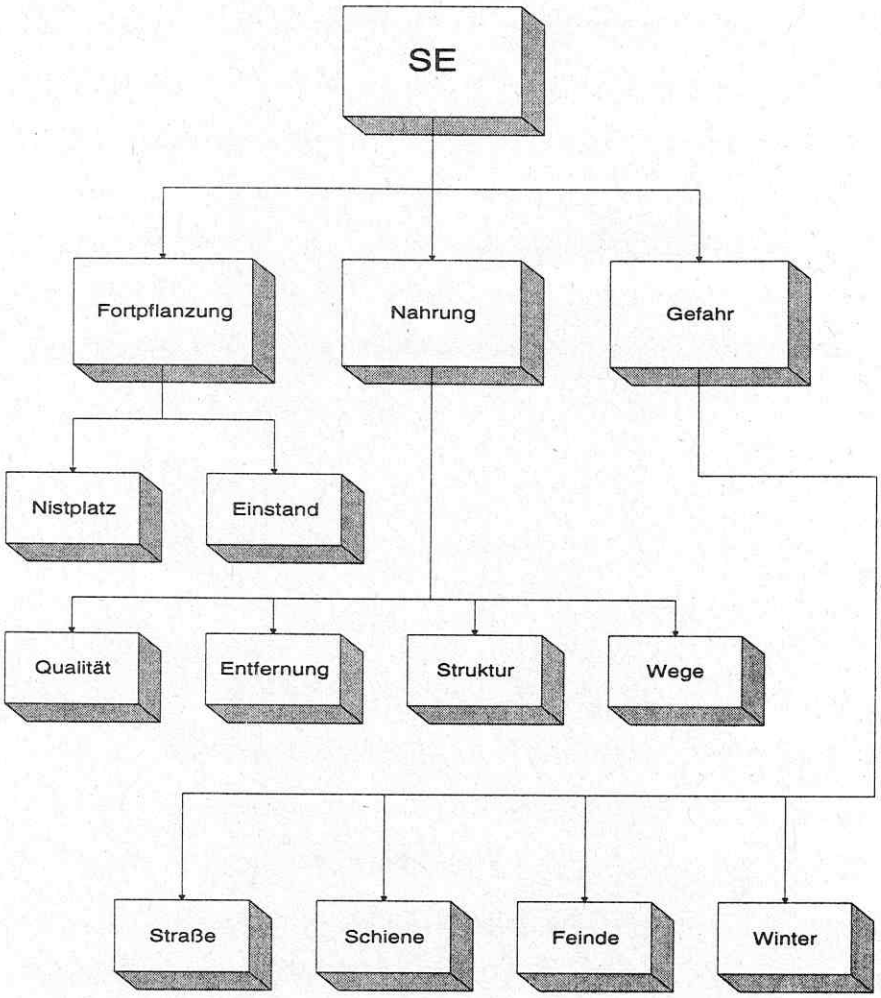


Abb. 3.3-2: Hierarchie des Schleiereulenhabitats

Fuzzy-Ansatz. Unscharfes Wissen wird mittels unscharfer Mengen und darauf aufbauend unscharfen Regeln beschrieben. Unter einer unscharfen Menge soll im weiteren folgendes verstanden werden:

$$A = \left\{ \left(x_1, \mu(x_1)\right), \left(x_2 \mu(x_2)\right), \ldots, \left(x_n, \mu(x_n)\right) \right\} x_i \in G \qquad \text{(Gl.1)}$$

Hierin bezeichnet G die Gesamtheit der Objekte und $\mu(x_i)$ die Zugehörigkeit des Elements x_i zur unscharfen Menge. Die Festlegung der Zugehörigkeitsfunktion in konkreten Realisierungen unscharfer Mengen bereitet dem Modellierer in der Regel die meisten Schwierigkeiten. Hier muß er sich nämlich entscheiden, inwieweit eine Situation (Objekt) zu einer Klasse gehört oder ob sie schon zu einer Nachbarklasse zuzurechnen ist. Ein Großteil des Erfahrungswissen geht in die Festlegung der Zugehörigkeitsfunktion ein. Über die Zugehörigkeitsfunktion ist eine differenzierte Steuerung des Verhaltens des Gesamtsystems

möglich, so daß es lohnt hier adaptive Algorithmen einzusetzen, die es erlauben auch nachträglich eine Anpassung der Zugehörigkeitsfunktion vorzunehmen. Am Beispiel der Bestimmung des Gefährdungspotentials einer Straße soll der Prozeß der Fuzzy-Modellierung einmal durchexerziert werden.

Zugehörigkeitsfunktion zum Gefährdungspotential einer Straße. Für die Modellierung der Gefährdung einer Straße müssen zuerst die diese Gefährdung bestimmenden Faktoren analysiert werden. Folgende Faktoren bestimmen die Gefährdung einer Straße bzgl. der Schleiereule:

- Verkehrsdichte;
- Entfernung zum Nistplatz;
- Lage bzgl. des Grünlandanteils und
- Schutzbebauung.

Die Verkehrsdichte ist durch das Termset: 'sehr hoch', 'hoch', 'mittel' und 'gering' beschreibbar. Die Lage charakterisiert den potentiellen Nahrungsanteil des Gebietes, ausgedrückt im Grünlandanteil, um die Straße. Hier spielt der Gedanke eine Rolle, daß eine Straße um so gefährlicher für die Schleiereule ist, um so besser die potentiellen Jagdmöglichkeiten um die Straße sind. Die restlichen Faktoren, Entfernung und Schutzbebauung sind selbsterklärend. Die für die Modellierung wichtige Festlegung der Termsets erfolgt dergestalt, daß das Regelwissen in ausreichender Genauigkeit durch die Klassen (Terme) beschreibbar ist. Die Anzahl der Klassen wird damit durch das Regelwissen determiniert. Die Zugehörigkeit zu den Klassen und vor allem die Übergangsbereiche sind durch die Zugehörigkeitsfunktion festgelegt. Für viele praktische Aufgaben haben sich einfache Trapezfunktionen bewährt. Diese Art der Funktion ist einerseits leicht parametrisierbar, andererseits aber auch genügend flexibel um ein großes Spektrum an Aufgabenklassen zu behandeln. Viele, aus der Literatur bekannte Fuzzy-Systeme nutzen daher diese Trapezfunktion (TREGER 1994).

Für die Verkehrsdichte soll eine Zugehörigkeitsfunktion probeweise entworfen werden. Hierzu ist bei einer wissenschaftlichen Herangehensweise eine Untersuchung über den Zusammenhang Verkehrsdichte/Todfunde bei Schleiereule an verschiedenen Verkehrsadern notwendig. Im angeführten Beispiel wurde diese Untersuchung nicht durchgeführt, da es hier um eine Erklärung der Methode, nicht um eine endgültige Modellierung geht. Die Einteilung der Verkehrsdichte erfolgte, wie oben angeführt, in vier Klassen:

- gering: 0 ... 250 Fahrzeuge/h;
- mittel: 500 ... 1250 Fahrzeuge/h;
- hoch: 2000 ... 3000 Fahrzeuge/h und
- sehr hoch: 4750 ... Fahrzeuge/h.

In Abbildung 3.3-3 wurde die Zugehörigkeitsfunktion graphisch dargestellt. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Übergangsbereiche zwischen den Klassen zu legen. So kann z.B. aus dieser Graphik entnommen werden, daß 3200 Fahrzeuge/h einer Klassenzugehörigkeit von hoch zu 0.8 und von sehr hoch zu 0.2 entspricht. Bildlich gesprochen liegt eine hohe Verkehrsdichte vor, die aber in der Tendenz schon zu einer sehr hohen Dichte geht.

Regeln im Fuzzy-Ansatz. Nach Festlegung der Zugehörigkeitsfunktionen muß das Wissen über die 'Zusammenhänge' des Experten in Form von Regeln formuliert werden. Dieser zweite Schritt bei der Fuzzy-Modellierung ist im wesentlichen unproblematisch, da hier der Experte in einer ihm gut bekannten Domäne sich bewegt. Eine Regel beschreibt den Zusammenhang zwischen linguistischen Variablen und dem in unserem Fall als 'scharfe' Ausgangsgröße formulierten Gefährdungspotential. Eine Regel kann in unserem Beispiel folgendermaßen lauten:

```
IF Verkehrsdichte == gering
     AND Entfernung == mittel
     AND Grünlandanteil == gering
     AND Schutzbebauung == gering
THEN Gefährdung = gering
```

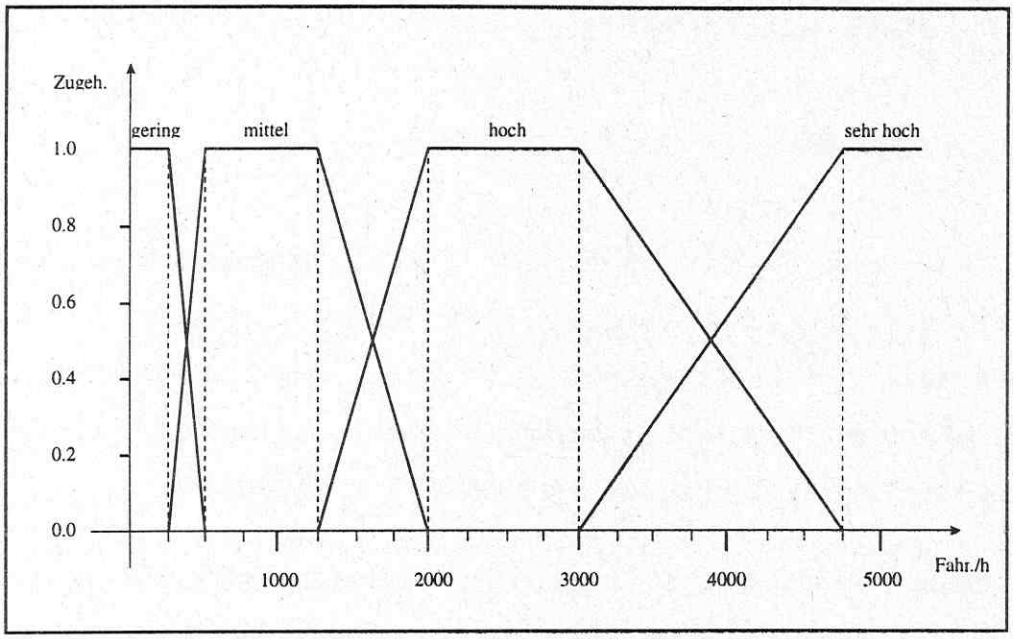


Abb. 3.3-3: Zugehörigkeitsfunktion

In einem Fuzzy-System kommen meist sehr viele Regeln zum tragen. Für kleine Systeme reichen oft einige zehn, für große Systemen sind es aber recht oft auch einige tausend Regeln. In unserem einfachen Testbeispiel zur Bestimmung des Gefährdungsgrades umfaßt die Regelbasis 72 Regeln. Die Abbildung 3.3-4 zeigt bestimmte Zusammenhänge, die durch die Regelbasis beschrieben werden.

Berechnung des Fuzzy-Outputs. Aus den Zugehörigkeitsfunktionen und den Regeln ist ein unscharfes Ergebnis berechenbar. Die hierzu eingesetzten Methoden wie: 'Min/Max-Methode' oder der 'Max/Prod-Methode' haben sich in vielen Praxisbeispielen bewährt und werden dementsprechend auch hier eingesetzt. Für unser Beispiel wurde die besonders einfache, aber sehr robuste 'Min/Max-Methode' ausgewählt. Bei dieser Methode berechnet sich der unscharfe Output:

$$\mu^{output}_{x_1,x_2,\ldots,x_n} = \max_{r\in 1,\ldots,k} \min\left\{\mu^{(1)}_{i1,r}(x_1),\ldots,\mu^{(n)}_{in,r}(x_n)\right\} \qquad (G1.2)$$

aus dem Maximum über alle Regeln $r \in 1,\ldots,k$ und dem Minimum der 'Und'-verknüpften Zugehörigkeitsgrade $\mu^{(1)}_{i1,r}(x_1),\ldots,\mu^{(n)}_{in,r}(x_n)$. Der Einsatz der 'Oder'-Verknüpfung führt gleichfalls zur Bildung des Maximums. Aus den unscharfen Zugehörigkeiten der einzelnen

$\mu^{output}_{x_1,x_2,...,x_n}$, die im weiteren mit μ_i abgekürzt werden, errechnet sich der scharfe Output der Bewertungsgröße x_L wie folgt:

$$X_L = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i \times \mu_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu_i} \qquad (Gl.3)$$

Dabei bedeuten die einzelnen x_i die auf die x-Achse bezogenen Gefährdungspotentiale. In unserem Beispiel meint eine geringe Gefährdung einen Wert um die 1.0, eine mittlere Gefährdung einen Wert um 0.66, eine starke Gefährdung einen Wert um 0.33 und eine sehr starke Gefährdung liegt um 0.01. Diese Zahlenwerte dienen dann als Eingangsgrößen für eine weitere Modellierung.

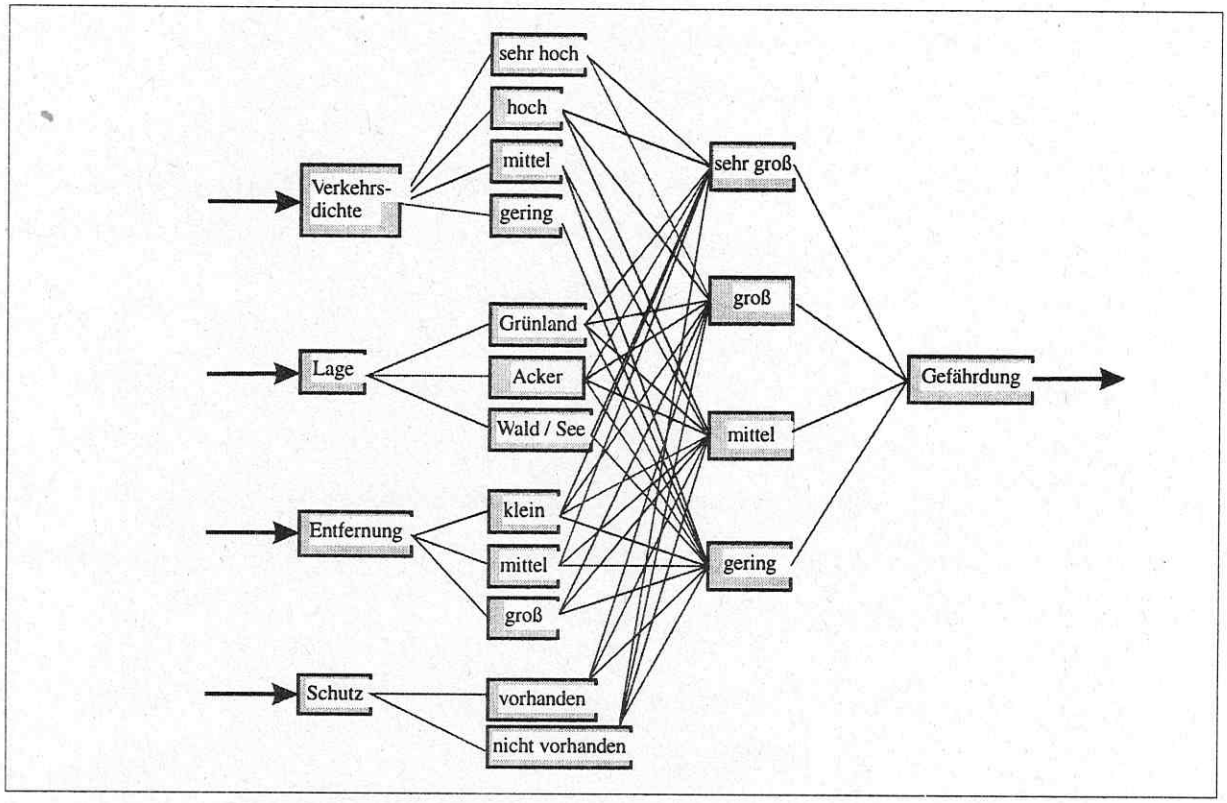


Abb. 3.3-4: Verknüpfung in einem Fuzzy-System

Charakter der Modellausgabe. Die mit dem Fuzzy-Ansatz gewählten Modellansätze zeigen ein robustes Verhalten. D.h. solange ein Wert sich in einer Klasse befindet führen kleine Änderungen zu keinen Änderungen im Output. Erst wenn sich die Eingangsgrößen die Klassengrenze überschreiten und sich damit einer neuen Klasse nähern, gibt es Übergänge. Diese Übergänge sind zum Teil recht dramatisch. Für biologische Systemen ist dieses

Verhalten häufig adäquat. Bekannte Phänomene wie das 'Umkippen' eines Sees zeigen dieses Verhalten. Zuerst ist kaum eine Änderung beobachtbar, bei Überschreiten einer Grenze verändert sich das System dramatisch. Diese, für relativ elementare biologische Systeme charakteristische Verhalten ist bei hochaggregierten Systemen nicht mehr so ausgeprägt sichtbar. Hier tritt ein Mechanismus möglicher Kompensationen in Kraft, der das Systemverhalten überdeckt. Damit ist der Fuzzy-Ansatz vor allem geeignet elementare Systemvariable zu beschreiben, für die höherkomplexen Variable ist ein mehr kontinuierliches Verhalten wünschenswert.

Adaption des Fuzzy-Ansatzes. Eine Kalibrierung des Fuzzy-Modells ist weitestgehend durch eine Adaption der Zugehörigkeitsfunktion möglich. Dazu werden die Zugehörigkeitsfunktionen schrittweise verschoben und in ihrer Steilheit geändert, so daß sie den praktischen Erfordernissen angepaßt werden. Das kann sowohl manuell oder durch den Einsatz eines speziellen Adaptionsalgorithmus geschehen.

Eine weitere Möglichkeit der Adaption liegt in der Anpassung der Regelbasis. Eine derartige Adaption setzt eine geeignete Kodierung der Regelbasis voraus. Als Lernalgorithmen kommen Verfahren aus der Gruppe der 'genetischen' Algorithmen in Frage.

Die Adaption der Zugehörigkeitsfunktionen ist immer erforderlich, wohingegen die Anpassung der Regelbasis wohlbegründeten Ausnahmen vorbehalten bleiben sollte. Letzteres erfordert einen Eingriff in strukturelles Wissen des Experten und ist nur über experimentelle Untersuchungen realisierbar. Damit wird ein wichtiger Vorteil der Fuzzy-Modellierung, nämlich die direkte Nutzung von Erfahrungswissen aufgegeben.

Modellierung mit Neuronalen Netzen. In höheraggregierten Systemen, wie dem Habitat selbst, aber auch in Faktoren des Habitats, wie der Fortpflanzungsbedingung, der Nahrungsbedingung und der Gefährdung liegen keine Erfahrungen zur Aggregationsstruktur mehr vor, wie das bei elementaren Faktoren der Fall war. Der Einsatz des Fuzzy-Ansatzes wird hier zunehmend schwieriger und kann höchstens durch adaptive Systeme noch erfolgversprechend angewandt werden. In dieser, durch zunehmende Unklarheit bei der Wirkstruktur charakterisierten Domäne, haben in letzter Zeit Neuronale Netze erfolgversprechende Ansätze geliefert. Dabei wird in der Literatur (NAUK et al. 1994) hauptsächlich auf die Lernfähigkeit von Netzstrukturen verwiesen. Die mindestens genauso bedeutsame Fähigkeit zur Generalisierung mit Neuronalen Netzen wird häufig wenig beachtet.

Gerade diese Eigenschaft macht aber den Einsatz Neuronaler Netze in der Modellierung biotischer Komponenten so interessant. Wenn es gelingt, Lernbeispiele geschickt zu wählen, so sind Neuronale Netze in der Lage, aus diesen Beispielen quantitative Zusammenhänge (Funktionen) abzuleiten. Untersuchungen haben gezeigt, daß es durchaus ausreichend sein kann, mit nur wenigen (20 ... 60) Beispielen recht genaue Approximationen der unbekannten Funktion zu generieren. Zu beachten ist aber, daß diese Generalisierung eine wesentliche 'Verschleifung' der Modellcharkteristik führt, welches erst ab einer bestimmten Aggregationsstufe tolerierbar ist. Für elementare Faktoren liefert ein Neuronales Netz unter Umständen einen zu 'homogenen' Output, der den oben beschriebenen 'dramatischen' Charakter nicht entspricht. Auch hier gilt wieder, daß in den Übergangsbereichen der Einsatzgebiete von Neuronalen Netzen und des Fuzzy-Modellansatzes nur detaillierte Untersuchungen über die geeignete Modellart entscheiden kann.

Arbeitsweise Neuronaler Netze. Ein Neuronales Netz erwartet als Trainingsmenge ein ASCII-File mit numerisch kodierten Größen. Als sinnvoller Bereich der Eingangs- und Ausgangsgrößen wurde wieder der Bereich von [0.0 ... 1.0] gewählt. Ein anderer Bereich ist ohne weiteres realisierbar, aber die Beschränkung auf den gewählten Bereich hat numerische Vorteile. Aufgabe des Experten ist es, sein Wissen in diesen Bereich zu transformieren. Dazu werden Tabellen erzeugt, die die Zusammenhänge an wichtigen Punkten beschreiben. Ein Auszug aus der Tabelle, die einen Zusammenhang zwischen Fortpflanzung, Nahrung und Gefährdung beschreibt ist in Abbildung 3.3-5 dargestellt.

Aus dieser Tabelle (Datei) erzeugt das Neuronale Netz, dargestellt in Abbildung 3.3-6, ein C-Programm. Der Trainingsprozeß des Netzes besitzt eine Reihe von Optimierungsmöglichkeiten, so daß der Prozeß recht zeitaufwendig werden kann, bis ein befriedigendes Resultat erzielt wird. Auch hier ist letztendlich der Experte gefragt, der das Lernergebnis kritisch betrachten, interpretieren und bewerten muß. Erst nach dieser Freigabe durch den Experten ist der Trainingsprozeß beendet. Zur Interpretation des Lernergebnisses des Neuronalen Netzes wurden eine Reihe von Tools entwickelt, die eine graphische Darstellung erlauben. Eine solche Darstellung ist in Abbildung 3.3-7 gegeben. Mit Hilfe dieser und ähnlicher Darstellungen kann der Experte dann auch besonders wichtige Bereiche speziell untersuchen. Das ist deshalb bedeutsam, da das Modell eine ganzheitliche Sicht liefert, aber für praxisnahe Modellierung häufig nur eingeschränkte Bereiche interessant sind. Die in Abbildung 3.3-7 und 3.3-8 gezeigten Grafiken geben parametrisierte Beispiele der

Habitatgüte einmal bei einem konstanten Parameter Gefahr = 0.5, das andere Mal mit dem Parameter Fortpflanzung = 0.8 wider. Damit wird es möglich bei diesen Parametern die Wirkung der Faktoren fortpf/nahr bzw. nahr/gefahr auf die Habitatgüte zu untersuchen

Fortpflanzung	Nahrung	Gefährdung	Habitat
0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	0.0	0.0	0.05
1.0	0.0	0.0	0.1
0.0	0.5	0.0	0.0
0.5	0.5	0.0	0.3
1.0	0.5	0.0	0.5
0.0	1.0	0.0	0.0
0.5	1.0	0.0	0.25
1.0	1.0	0.0	0.65
...	...	...	...

Abb. 3.3-5: Beispieltabelle für das Neuronale Netz

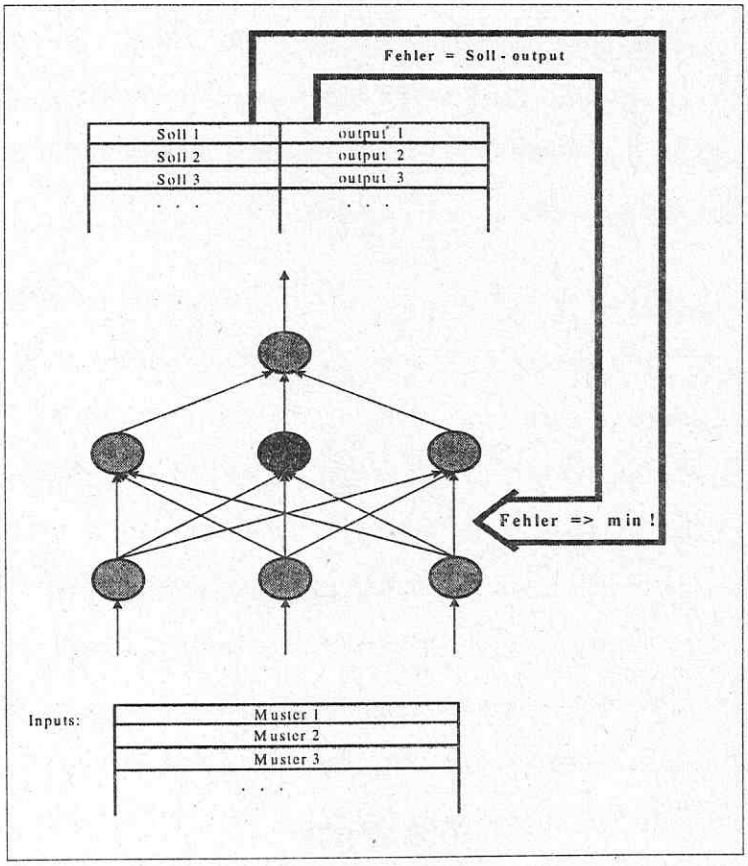


Abb. 3.3-6: Lernen mit Neuronalen Netzen

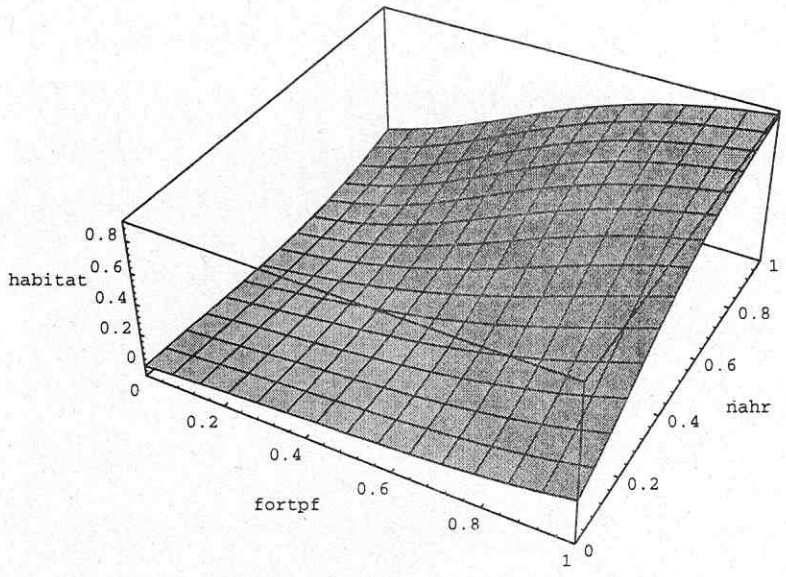


Abb. 3.3-7: Habitat als Funktion von fortpf und nahr, Parameter gefahr = 0.5

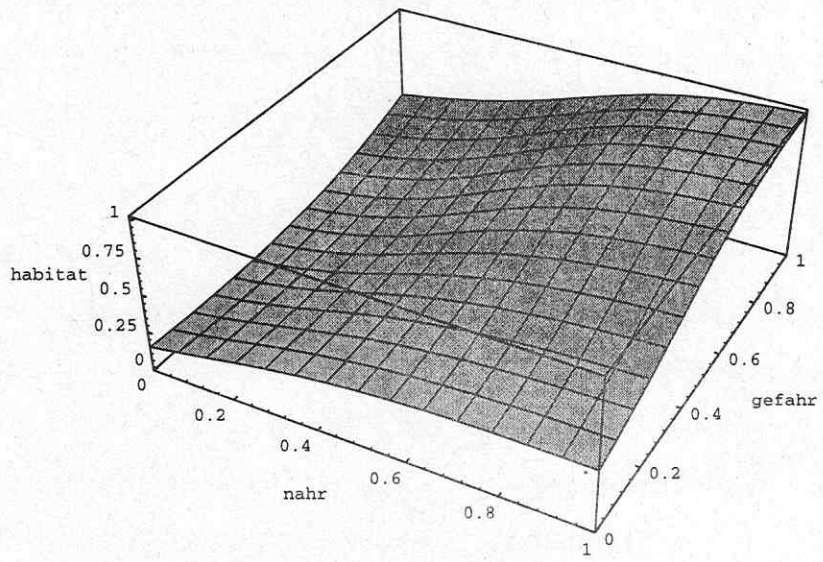


Abb. 3.3-8: Habitat als Funktion von nahr und gefahr, Parameter fortpf = 0.8

Mit Hilfe dieser und ähnlicher Darstellungen kann der Experte dann auch besonders wichtige Bereiche speziell untersuchen. Das ist deshalb bedeutsam, da das Modell eine ganzheitliche Sicht liefert, aber für praxisnahe Modellierung häufig nur eingeschränkte Bereiche interessant sind. Die in Abbildung 3.3-7 und 3.3-8 gezeigten Grafiken geben parametrisierte Beispiele der Habitatgüte einmal bei einem konstanten Parameter Gefahr = 0.5, das andere Mal mit dem Parameter Fortpflanzung = 0.8 wider. Damit wird es möglich bei diesen Parametern die Wirkung der Faktoren fortpf/nahr bzw. nahr/gefahr auf die Habitatgüte zu untersuchen.

3.3.3 Ergebnisse

Der Expertensystemmodus des Modells stellt einen Algorithmus zur Verfügung der es erlaubt, interaktiv mit dem Modell zu experimentieren. Der Anwender wird damit in die Lage versetzt, selbst Vorgaben dem Modell zu übergeben und die Antworten des Modells zu beobachten. Damit liegt aber auch die Verantwortung der Modellauswertung in der Hand des Anwenders. Er muß sich um die Richtigkeit seiner Eingaben kümmern, er muß sich Daten durch Karten, das GIS, oder andere Datenquellen besorgen, hat aber die Möglichkeit, sehr schnell mögliche Szenarien durchzuspielen und verschiedene Varianten in seine Überlegungen einzubeziehen. Die räumliche Ausdehnung liegt dann immer in der Größenordnung eines potentiellen Habitats der betrachteten Tierart. Für größere Räume müssen dementsprechend mehrfache Modellrechnungen durchgeführt werden.

Vorgehensweise im Expertensystemmodus. Der Expertensystemmodus bietet gegenüber dem GIS-Modus eine erweiterte Modellrechnung an. Neben der normalen Modellrechnung, die von den Blättern ausgeht und schrittweise bis zum Habitat fortgesetzt wird, ist auch eine Berechnung von Intervallen unter Beachtung von Vorgaben möglich. Vereinfacht gesprochen kann der Anwender bestimmte Vorgaben setzen, in den Bereichen sich eine Größe befinden muß. So könnte z.B. im Habitatmodell der Schleiereule gefordert werden, daß die Fortpflanzungsbedingung nicht schlechter als 0.8 sein darf. Durch einen gewissen finanziellen Aufwand, in Form von Brutkästen, baulichen Veränderungen in den als Nistplatz bevorzugten Kirchen ist das sicher erreichbar. Weiterhin könnte in das zu berechnende Szenarium die aktuelle Nahrungssituation als Eingabe vorhanden sein. Mit diesen Eingaben ist es möglich, Fragen der Gestalt an das Modell zu stellen:

- Welche Habitatgüte ist in Abhängigkeit der Gefährdung erreichbar ?

- Ist durch eine Verbesserung der Nahrungssituation eine Verschlechterung der Gefährdung auffangbar ?
- Sind eventuell komplexe Maßnahmen erforderlich, um eine Mindestgüte des Habitats zu garantieren ?

Der Expertensystemmodus erlaubt also neben der normalen Modellierung auch die Behandlung der inversen Problemstellung, also der Vorgabe von Zielwerten und der Rückrechnung auf die Eingangsgrößen. Leider ist diese inverse Berechnung numerisch sehr aufwendig, so daß es nur im Expertensytemmodus möglich ist, diese Option anzubieten. Im GIS-Modus kommt aufgrund des hohen Datenaufkommens durch die zu Grunde liegenden digitalen Karten, diese Möglichkeit nicht in Frage.

Interessant bei diesen inversen Berechnungen ist, daß das Modell nichtlineare Systeme behandelt, die der Mensch in dieser Form kaum ohne Modellierung lösen könnte. Auch der Experte, der das System mit entwickelt hat, kann von dieser Möglichkeit profitieren. Bemerkt sei an dieser Stelle, daß Expertensysteme im klassischen Sinn von Experten für Anwender gemacht sind. Der Experte liefert sein Wissen, der Anwender nutzt es. Der Vorteil bei dieser klassischen Methode liegt darin, daß der teuren Experten, die auch nur selten verfügbar sind, durch den Rechner in gewissen Fragen zu ersetzen. In unserem Modellsystem wird angestrebt, auch für den Experten eine Wissenbasis verfügbar zu machen und den Experten damit aktiv in eine überlagerte Entscheidungsfindung mit einzubeziehen.

GIS-Modus. Im GIS-Modus geht es um die Erfassung großer Gebiete. Diese Gebiete beinhalten in der Regel mehrere Habitate. Die Vergrößerung führt zu einer Zunahme der Unschärfe, zeigt dafür aber großräumige Zusammenhänge, die im Expertensystemmodus nicht erkannt werden. Durch diese ganzheitliche Erfassung werden Informationen erschlossen, die durch die Summe der Teilbetrachtungen nicht sichtbar sind. Damit bilden der GIS-Modus und der Expertensystemmodus zwei Teile eines Modellsystems, die für unterschiedliche

3.3.4 Schluß

Mit dem Modellsystem wurde eine Strategie zur Bewertung von Räumen als Lebensraum bestimmter Leittierarten geschaffen. Diese Strategie hat sich als tragfähig erweisen und wurde u.a. auch bei der Modellierung von Sukzessionsvorgängen indigener Pflanzen erfolgreich eingesetzt. Aufbauend auf dieser Strategie wurde eine Technologie entwickelt, die es erlaubt

recht schnell Untersuchungen auch auf andere Tierarten oder andere Räume auszudehnen. Als eigentliches Problem besteht heute nicht mehr die Erfassung neuer Tierarten, sondern die Aufbereitung der Datenbasis im GIS. Für sehr anspruchsvolle Tiere, wie z.B. dem Kranich wird auch ein sehr feines Kartenmaterial als Arbeitsgrundlage benötigt. Die damit verbunden Detailarbeit bindet ca. 75% der Entwicklungskapazität für die Modelle. Bei Vorhandensein eines guten Kartenmaterials können mit der entwickelten Methode recht schnell Prototypen der Modelle erzeugt werden, die dann je nach Aufwand der beteiligten Biologen zu leistungsfähigen Modellen ausbaubar sind.

3.4 Klein- und mittelmaßstäbige Landschaftsbewertung unter Einbeziehung der Theorie der unscharfen Mengen

Uta Steinhardt

3.4.1 Problemstellung

Landschaftsbewertungen müssen heute sowohl der Anforderung nach einer naturwissenschaftlich fundierten Gewinnung und integrativer Aufarbeitung landschaftsökologischer Basisdaten als auch nach einer Anwendbarkeit und Umsetzung in der Planung, die wiederum gesellschaftlich determiniert ist, genügen. Die daraus resultierenden Widersprüche werden u.a. von BARSCH et al. (1994) kritisiert und zum Anlaß genommen, Lösungsansätze für die momentane Unvereinbarkeit von natur- und sozialwissenschaftlichen Aspekten zu erarbeiten. Im Hinblick auf eine ausgewogenen Realisierung aller landschaftlichen Grundfunktionen (Regulations-, Produktions-, Standort- und Informationsfunktion) als Grundlage einer nachhaltigen und damit notwendig umweltverträglichen Entwicklung sollte die Landschaftsbewertung die Ausweisung von Präferenzräumen für bestimmte Nutzungsformen bei Sicherung einer Mehrfachnutzung sowie eine Optimierung aller in Betracht kommenden Gestaltungsvarianten vorbereiten.

Die wesentliche Schwäche landschaftlicher Bewertungsverfahren ist darin zu sehen, daß das Bestreben, die reell existierende aber nicht zu erfassende Komplexität ökologischer Phänomene oft in ein derartig kompliziertes Verfahren mündet, das für den Planer in der Praxis kaum noch nachvollziehbar ist. Forschungsbedarf besteht deshalb weniger in der Entwicklung neuer Bewertungsverfahren als vielmehr in der Suche und begründeten Auswahl von geeigneten Indikatoren landschaftshaushaltlicher Funktionen.

Als räumliche Bezugseinheiten der Landschaftsbewertung stehen Naturräume, Wirtschafts- und Sozialräume (Lebensräume) sowie Landschaftsräume als unterschiedliche geographische Raumkategorien zur Disposition. Allgemeingültige Kriterien zur Abgrenzung dieser Raumkategorien gibt es nicht. In der Flächennutzung als Art und Prozeß der Inanspruchnahme von Teilen der Erdoberfläche durch die Gesellschaft manifestiert sich die Kopplung von Natur und Gesellschaft am deutlichsten. Somit sind (individuelle oder typisierte) Landschaftseinheiten als Synthese aus Naturraumtypen, Flächennutzungsformen und topographischen Kriterien der räumliche Ausdruck der Wechselwirkung zwischen Natur und Gesellschaft und als Basisflächen der Bewertung, die - wie oben gezeigt - sowohl natur- als

auch gesellschaftswissenschaftlichen Anforderungen genügen sollen geeignet. Eine solche von KRÖNERT (1996) erarbeitete Landschaftsgliederung für den Ballungsraum Leipzig-Halle und angrenzende Gebiete liegt vor.

Während naturräumliche Grenzen mehr oder weniger als langfristig stabil angenommen werden können, müssen Landschaftsgrenzen bei Nutzungsänderungen stets neu bestimmt werden. Da jedoch die Grundgrößen des Landschaftshaushaltes ganz wesentlich von der Landbedeckung und Landnutzung geprägt werden, ist es legitim, die Landschaftseinheiten zunächst als quasihomogene Bezugsräume aufzufassen. Dies ist auch Voraussetzung, da gängige Verfahren zur Bewertung ausgewählter Landschaftsfunktionen in der Regel auf großmaßstäbigen Datenerhebungen basieren und sich auf mehr oder weniger naturräumlich homogene Einheiten beziehen bzw. auf Flächen, die sich aus der kleinsten Geometrie der Verschneidung von Naturraum- und Flächennutzungseinheiten ergeben.

Solche handhabbaren Bewertungsverfahren, die im Wesentlichen auf dem Ansatz der Kombination von Potentialkonzepten von HAASE (1978) und MANNSFELD (1978) basieren, sind u.a. bei HENNINGS (1994) und MARKS et al. (1992) zusammengestellt, und BARSCH et al. (1994) zeigt Möglichkeiten ihrer Anwendung. Diese Bewertungsverfahren galt es auf das o.g. Untersuchungsgebiet anzuwenden.

Für die Landschaftseinheiten im Kernraum des Untersuchungsgebietes standen als Bewertungsgrundlage folgende Basisdaten zur Verfügung:

- Flächengröße
- prozentualer Anteil von Bodenarten
- prozentualer Anteil von Flächennutzungsformen
- prozentualer Anteil von Grundwasserflurabstandsklassen
- Jahressumme des Niederschlages
- Jahressumme der reellen Evapotranspiration
- Jahressumme des oberirdischen Abflusses
- geologische Entstehung, Hangneigungsklassen
- Jahresmitteltemperatur.

Auf dieser Datengrundlage sollte mit Bezug auf die o.a. Verfahren eine Bewertung der Zielgrößen Erosionsgefährdung durch Wasser, Erosionsgefährdung durch Wind, Grundwasserschutz, landschaftliche Erholungseignung und Ackerbaueignung abgeleitet werden

3.4.2 Theoretische und methodische Grundlagen

Bei den hier zu bewertenden Bezugseinheiten handelt es sich um Landschaftsausschnitte der chorischen Dimension, die hinsichtlich Flächennutzungsstruktur und naturräumlicher Ausstattung mehr oder weniger heterogen sind. Da die eingangs diskutierten Bewertungsverfahren jedoch nur auf homogene Areale anwendbar sind, wird von SYRBE (1995, 1996a) zur Bewertung ein Datenmodell eingeführt, das es erlaubt, mögliche Schwankungsbreiten zu berücksichtigen und auch bei unsicherer und unvollständiger Datengrundlage Aussagen treffen zu können - das Modell der unscharfen Mengen (Fuzzy-Sets).

Definition: Eine scharfe („normale") Menge läßt sich beschreiben durch ihre charakteristische Funktion: f(x)=1, wenn x Element der Menge M ist, und F(x)=0, wenn x nicht Element von M ist. Eine unscharfe Menge läßt sich ebenfalls durch eine charakteristische Funktion darstellen mit der Verallgemeinerung, daß $0 < f(x) <= 1$, wenn x Element von M ist.

Die wesentlichen Schritte der Anwendung dieses Datenmodells sollen im folgenden am Beispiel der Grundwasserschutzfunktion dargestellt werden. Den Rahmen zur Abschätzung des Geschütztheitsgrades des Grundwassers gibt Tabelle 3.4-1 wieder.

Tab. 3.4-1 Bewertung der Grundwasserschutzfunktion (1- sehr gering, 2- gering, 3- mäßig, 4- mittel, 5- hoch) in Abhängigkeit von Grundwasserflurabstand (GWFA) und Bodenart (BA) (sT - sandiger Ton, lT - lehmiger Ton, T - Ton, tL-utL - tonig bis schluffig-toniger Lehm, stL - sandig-toniger Lehm, uT - schluffiger Ton, sL - sandiger Lehm, sU - sandiger Schluff, uL-lU - schluffiger Lehm bis lehmiger Schluff, s'U - schwach sandiger Schluff, SL - stark sandiger Lehm, lS - lehmiger Sand, u'S - schwach schluffiger Sand, uS - schluffiger Sand, S - Sand, G - Grus, K - Kies) (nach MARKS et al. S.78)

Bodenarten / Grundwasser-flurabstand	sT, lT, T	tL-utL, stL uT	sL, sU, uL-lU, s'U	LS, lS, u'S, uS	S, G, K
> 200 cm	5	5	4	3	2
130 -200 cm	4	3	3	2	2
80 - 130 cm	1	2	2	1	1
< 80 cm	1	1	1	1	1

Die Anwendung der Theorie der Fuzzy-Sets beginnt mit der Operationalisierung der Zugehörigkeitsfunktion (Fuzzifizierung der Eingangsdaten). Nach MAYER et al. (1993) existiert bis heute kein universeller axiomatischer Ansatz zur Bestimmung einer expliziten Zugehörigkeitsfunktion. Hinsichtlich der hier zu bearbeitenden Daten, die sich auf die Fläche einer Landschaftseinheit beziehen, wird die Zugehörigkeitsfunktion aus dem prozentualen Flächenanteil der betreffenden Eingangsparameter (Klassen ökologisch ähnlicher Bodenarten, Grundwasserflurabstandsklassen, Flächennutzungsformen). Diese pragmatische Vorgehensweise erscheint sinnvoll, da die Zugehörigkeitsgrade ohnehin nicht eindeutig definiert sind. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Datenbasis zum Grundwasserflurabstand (Klassengrenzen 1m und 2m) war es erforderlich, zuvor die Klassengrenzen des Bewertungsverfahrens formal an die der Datenbasis anzupassen wie in Tabelle 3.4-2 dargestellt. Für ausgewählte Landschaftseinheiten im Untersuchungsgebiet ergibt sich eine Darstellung gemäß Tabelle 3.4-3 und 3.4-4.

Tab.3.4-2 Anpassung von Bewertungsverfahren (nach Tab. 3.4-1) und Eingangsdaten (zur Erklärung der benutzten Abkürzungen siehe Tab. 3.4-1)

GWFA	BA 1	BA 2	BA 3	BA 4	BA 5
> 200cm (GWFA1)	5	5	4	3	2
100-200 cm (GWFA 2)	4	3	3	2	2
< 100 cm (GWFA 3)	1	1	1	1	1

Tab. 3.4-3 Möglichkeitswerte der Bodenarten für ausgewählte Landschaftseinheiten (zur Erklärung der benutzten Abkürzungen siehe Tab. 3.4-1)

		BA 1	BA 2	BA 3	BA 4	BA 5
2806	Zentrale Dübener Heide	0	0	0	0.9	0.1
2813	Dahlener Heide	0	0	0.1	0.7	0.2
2904	Dessau-Magdeburger Elbtal	0.3	0.1	0	0.4	0.3
3105	Köthener Ackerland	0.5	0	0.3	0.2	0

Tab. 3.4-4 Möglichkeitswerte der Grundwasserabstände für ausgewählte Landschaftseinheiten ·

		GWFA 1 > 2m	GWFA 2 1-2m	GWFA 3 < 1m
2806	Zentrale Dübener Heide	0.9	0.1	0
2813	Dahlener Heide	0.7	0.2	0.1
2904	Dessau-Magdeburger Elbtal	0	0.4	0.6
3105	Köthener Ackerland	0.8	0.1	0.1

Prinzipiell erfolgt die Erweiterung der zweiwertigen Logik der klassischen Mengenoperationen zur mehrwertigen Logik der Fuzzy-Sets durch die Auffassung der logischen Konnektoren „und" „oder" „nicht" als Funktionen (nach MAYER et al. 1993): $\wedge, \vee$: $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ bzw. $\neg : [0,1] \rightarrow [0,1]$. Als Operatoren für Durchschnitt und Vereinigung unscharfer Mengen wurden t-Normen und t-Conormen (oder s-Normen) eingeführt. Eine Sonderstellung nehmen die dazwischen liegenden sogenannten Durchschnittsoperatoren ein. Danach wird durch eine t-Norm eine Klasse von Operatoren für die Durchschnittsbildung mit $t(0,0) = 0$; $t(x,1) = t(1,x) = x$ sowie den Eigenschaften der Monotonie, Symmetrie und Assoziativität bestimmt. Für s-Normen gelten die zuletzt genannten Eigenschaften analog sowie $s(1,1) = 1$; $s(x,0) = s(0,x) = x$. Für Operationen mit unscharfen Mengen steht eine Vielzahl von Operatoren zur Verfügung, deren Anwendbarkeit neben anderen Faktoren grundsätzlich vom Skalenniveau der Zugehörigkeitsfunktion (nominal, ordinal, intervall- oder verhältnisskaliert) abhängt. Dabei kann die Ableitung neuer Aussagen aus teilweise unscharfen Daten die Kopplung verschiedenartiger Operatoren erfordern.

3.4.3 Bewertungsbeispiel und kartographische Umsetzung

Zur Bewertung der Grundwasserschutzfunktion muß demnach eine t-Norm zur Anwendung kommen, da gemäß Tabelle 3.4-1 eine entsprechende Wertstufe nur dann erreicht wird, wenn sowohl das Kriterium der Klasse der Bodenarten als auch das der Grundwasserflurabstandsklasse erfüllt wird. Das zustandekommende Schätzergebnis ist somit kleiner oder gleich dem Minimum der beiden eingehenden Zugehörigkeitswerte. Die Anwendung des hier gewählten optimistischen Minimumoperators mit anschließender Mittelwertbildung (MW, Rundung auf eine Dezimalstelle) auf die o.a. Beispiele der Landschaftseinheiten ist in Tabelle 3.4-5 dargestellt. Der Zugehörigkeitsgrad zu jeder der fünf Bewertungsstufen des Grundwasserschutzes (GWS 1-5) basiert demgemäß auf folgenden Regeln, die innerhalb eines GIS programmierbar sind:

GWS 1 = MW[MIN(GWFA 3;BA 1); MIN(GWFA 3;BA 2); MIN(GWFA 3;BA 3);
MIN (GWFA 3;BA 4); MIN(GWFA 3;BA 5)]
GWS 2 = MW[MIN(GWFA 1;BA 5); MIN(GWFA 2; BA 4); MIN(GWFA 2;BA 5)]
GWS 3 = MW[MIN(GWFA 1;BA 4); MIN(GWFA 2; BA 2); MIN(GWFA 2, BA 3)]
GWS 4 = MW[MIN(GWFA 1;BA 3); MIN(GWFA 2; BA 1)]
GWS 5 = MW[MIN(GWFA 1;BA 1); MIN(GWFA 1; BA 2)]

Die unterschiedliche Anzahl der in die Mittelwertbildung eingehenden Parameter für die fünf Bewertungsstufen des Grundwasserschutzes ist dabei im Bewertungsverfahren selbst begründet (vgl. Tabelle 3.4-2). So wird der höchste Grad der Geschütztheit (GWS 5) nur bei gleichzeitigem Auftreten von hohen Grundwasserflurabständen (GWFA 1) und bindigen Substraten (BA1, BA2) erreicht. Im Gegensatz dazu weisen alle Bezugsräume mit oberflächennahem Grundwasser (GWFA 3) unabhängig vom Substrat (BA1, ... BA5) ein hohes Gefährdungspotential oder anders ausgedrückt, einen geringen Geschützheitsgrad (GWS 1) auf.

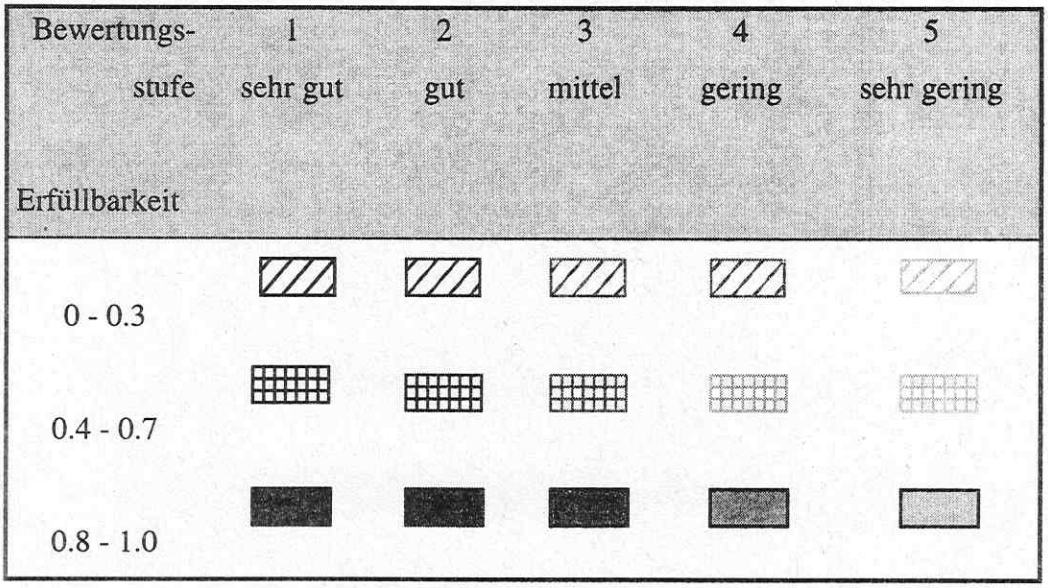
Anhand der Landschaftseinheit 2904 "Dessau-Magdeburger-Elbtal" sollen die in Tabelle 3.4-5 dargestellten Bewertungsergebnisse exemplarisch nachvollziehbar erläutert werden. Für die genannte Landschaftseinheit liefert die Anwendung des Bewertungsverfahrens die folgenden Resultate:

GWS 1 = MW[MIN(0.6;0.3); MIN(0.6;0.1); MIN(0.6;0); MIN (0.6;0.4); MIN(0.6;0.3)]
= MW [0.3, 0.1, 0, 0.4, 0.3] = 0.2
GWS 2 = MW[MIN(0;0.3); MIN(0.4; 0.4); MIN(0.4;0.3)]
= MW [0, 0.4, 0.3] = 0.2
GWS 3 = MW[MIN(0;0.4); MIN(0.4; 0.1); MIN(0.4, 0)]
= MW [0, 0.1, 0] = 0
GWS 4 = MW[MIN(0;0); MIN(0.4; 0.3)]
= MW [0, 0.3] = 0.1
GWS 5 = MW[MIN(0; 0.3); MIN(0; 0.1)]
= MW [0, 0] = 0

Tab. 3.4-5 Bewertung der Grundwasserschutzfunktion mit dem Minimumoperator

		GWS 1	GWS 2	GWS 3	GWS 4	GWS 5
2806	Zentrale Dübener Heide	0	0.1	0.3	0	0
2813	Dahlener Heide	0.1	0.2	0.3	0	0
2904	Dessau-Magdeburger Elbtal	0.2	0.2	0	0.1	0
3105	Köthener Ackerland	0.1	0	0.1	0.2	0.2

Die kartographische Umsetzung der Bewertungsergebnisse kann beispielsweise so realisiert werden, daß die Zugehörigkeit zu einer der fünf Bewertungsstufen selbst über die Farbe oder Grauwertabstufungen realisiert wird, der Grad der Zugehörigkeit über die Signaturendichte. Durch eine vorhergehende sinnvolle Grupppierung der auftretenden Möglichkeitswerte in drei Intervalle wird bei der kartographischen Überlagerung von vornherein deutlich, daß es Flächen gibt, die durch eher sichere Aussagen belegt werden können und andere, in denen dominierende und begleitende Bewertungsstufen vorhanden sind.



3.4.4 Schlußfolgerungen

Eine Lokalisierung der verschiedenen Ergebnisse innerhalb einer Bewertungseinheit ist jedoch auf diesem Wege nicht möglich. Der Bearbeiter kann dem Anwender jedoch somit vermitteln, für welche Areale eher einheitliche Maßnahmen getroffen werden können und welche stärker differenziert betrachtet und behandelt werden müssen. Für diese differenzierte Betrachtung sind dann entweder detailliertere Untersuchungen auf dem nächst niedrigen Niveau der Betrachtung erforderlich oder man wählt den Weg der Typisierung der zu bewertenden

Landschaftseinheiten, der es erlaubt, über bekannte korrelative Zusammenhänge wie beispielsweise entlang von Catenen solche differenzierenden Aussagen zu treffen.

Durch den abschließenden Schritt der Defuzzifizierung ist darüber hinaus eine leichtere Handhabbarkeit der Bewertungsergebnisse möglich. In der Regel ist es möglich, den Output-Fuzzy-Set verbal zu charakterisieren oder in eine (in der Regel) reelle Zahl zu überführen. Dabei geht jedoch zwangsläufig ein Teil der Information verloren. Für die Transformation einer unscharfen Menge in eine scharfe Ergebnisgröße haben sich die Flächenschwerpunkts- sowie die Maximum-Methode etabliert.

Die auf diesem Wege ermittelten Bewertungsergebnisse kommen der real vorhandenen Heterogenität in den Landschaftseinheiten dieser Größenordnung bedeutend näher als eine „klassische" Bewertung über Mittelwertbildung. Aus diesem Grunde scheint der Weg der Anwendung von Fuzzy-Sets bei derartigen Problemlösungen sehr erfolgversprechend zumal derzeit in der landschaftsökologischen Forschung eine verstärkte Orientierung auf Problemlösungen für das prozeßbezogene Forschen in der chorischen Dimension zu beobachten ist. Damit kann zugleich der praxisrelevanten Forderung nach Betrachtung von Räumen in planungsrelevanten Größenordnungen nachgekommen werden.

3.5 Fuzzy-Bewertungsmethodik für heterogene Naturräume - dargestellt am Beispiel der Erosionsbewertung im Westlausitzer Hügel- und Bergland -

Ralf- Uwe Syrbe

3.5.1 Die Anwendbarkeit unscharfer Logik in der Landschaftsbewertung

Wo Landschaftsbewertung als Schnittstelle zwischen naturwissenschaftlichen Erkenntnissen und politisch relevanten Entscheidungsgrundlagen fungiert, muß sie sich inhaltlich wie methodisch mit den dabei auftretenden Unschärfen auseinandersetzen. Zu den objektiven Lücken, Fehlern und Inkonsistenzen in der Informationsbasis treten dabei subjektiv-begriffliche Unsicherheiten.

Fuzzy-Ansätze sind sinnvoll einsetzbar, wenn es gelingt, Daten mit unterschiedlichen Arten von Unschärfe korrekt zu bearbeiten. Neben den informationsbedingten Unsicherheiten sind es vor allem Zuordnungs- und Klassifikationsprobleme (meist ganz konkreter Fakten) sowie Differenzen der Begriffs- oder Zielvorstellungen, die mit Hilfe der Fuzzy-Set-Theorie erfaßt werden können. Überall dort, wo es nicht gelingt, natürlicherweise bizarre Sachverhalte in vorgegebene „Schubladen" zu zwängen oder etwas Vielgestaltiges mit einem einzigen Wert zu belegen, bietet sich eine Fuzzifizierung an. In der Literatur finden sich viele Bewertungsschemata, die bisher nicht immer problemlos in der Praxis eingesetzt werden konnten, weil sie in Einzelfällen zu verschiedenen Ergebnissen führen (z. B.: AG BODEN 1994, S.328 oder BASTIAN & SCHREIBER 1994, S.305 ff.). Solche Verfahren sind nun mit den hier erläuterten unscharfen Bewertungsmethoden operationell anwendbar.

Im Rahmen der Landschaftsökologie erscheinen folgende Einsatzgebiete für Fuzzy-Verfahren besonders geeignet:

1. Rohdatenaufbereitung, z. B. Mustererkennung in der Fernerkundung;
2. Modellierung räumlicher Wertefelder, z. B. Höhen- sowie Klima- und Immissionsmodelle;
3. Vorhersage zeitlicher Abläufe, z. B. Abflußprognosen;
4. Bewertung, Typisierung und Datenaggregation als:
   - {scharfe} Aggregation {unscharfer} Daten, z. B. Landschaftsbewertung nach klassischen

- Verfahren, auf Grundlage abgeleiteter bzw. Sekundärinformationen;
- {unscharfe} Aggregation {scharfer} Daten, z. B. Bewertung komplexer Kriterien
- Umweltqualität nach verschiedenen Meßergebnissen;
- {unscharfe} Aggregation {unscharfer} Daten, z. B. Landschaftsbewertung heterogener Einheiten oder mittels unscharfer Verfahren;

5. unscharfe Datenbanken und -verarbeitungssysteme für qualitative Informationen.

Während für die Punkte 1 bis 3 und 4b bereits Anwendungsbeispiele existieren, widmet sich dieser Text den Aspekten a) und c) von Punkt 4. Ausführlich soll dabei auf die Applikation bekannter Bewertungsregeln für unscharfe bzw. heterogene Landschaftsdaten eingegangen werden. Besonderer Entwicklungsbedarf besteht auch noch zu Punkt 5, denn die effektiven Speicherungs- und flexiblen Verarbeitungsmöglichkeiten qualitativer Informationen könnten eine wichtige Ergänzung rein quantitativer Datenbestände ermöglichen.

Bei der Landschaftsbewertung findet man unterschiedliche objektive und subjektive Unschärfen, eng miteinander verflochten. Daraus resultiert eine Reihe methodischer Schwierigkeiten. Für den speziellen Fall der Bearbeitung heterogener Räume treten hierzu noch die im folgenden hervorgehobenen Probleme:

1. Unschärfe der Voraussetzungen und Klassifikationsunsicherheiten der Eingangswerte
2. Datenlücken und Ungenauigkeit der Datengrundlagen,
3. Zeitvariabilität und *räumliche Heterogenität*
4. Eingeschränkte Verfügbarkeit repräsentativer Indikatoren
5. *Unterschiedlicher Lagecharakteristika* der verschiedenen Merkmale eines Raumes
6. Ergebnisspannen bei den Bewertungsverfahren und Zielkonflikte
7. Aggregationsunsicherheit der Teilergebnisse (Ergänzung, Überlagerung, Ausschluß)

3.5.2 Naturräume als Bezugseinheiten für landschaftsökologische Analyse und Bewertung im mittleren Maßstab

Im Gegensatz zu kleinräumigen Untersuchungen, wo es gelingen kann, weitgehend homogene „Realflächen" oder genügend feine Raster einer Bewertung zugrunde zu legen, stößt man bei der Bearbeitung größerer Gebiete mit dieser Herangehensweise an Grenzen. Entweder zerschneiden wenige Gitterlinien eine Landschaft dann so willkürlich, daß in jeder Rasterfläche praktisch alle Werte eines Merkmals auftreten könnten oder die Überlagerung

unterschiedlicher Spezialkartierungen führt zum geometrischen „Schnittmusterbogen", fernab ökologischer Gesetzmäßigkeiten. Auch die heute technisch durchführbare Feinstbearbeitung größerer Regionen schafft kaum Abhilfe, denn erstens fehlt hierfür eine entsprechend detaillierte Datenbasis (die von statistischen Verfahren oft nur simuliert werden kann) und zweitens passen dabei Kartierungsmaßstab und Aussagedimension nicht mehr zueinander.

Geographen versuchen deswegen seit langem, Natur- und Landschaftsräume so zu erfassen, daß die konstruierten Einheiten der jeweils bearbeiteten Dimension entsprechen und nicht nur die Ausprägung einer einzigen Komponente widerspiegeln. Damit wird es möglich, die Wechselwirkungen verschiedener Umweltmedien (z. B. Wasser *und* Boden) für repräsentative Kombinationstypen zu untersuchen und im mittleren Maßstab auch horizontale Verflechtungen zu berücksichtigen. Diese Vorteile sind allerdings nur dann realisierbar, wenn auch Verfahren zur Verfügung stehen bzw. anwendbar gemacht werden, die einer solchen komplexen Herangehensweise entsprechen und die dadurch etwas veränderte Datenbasis (mit qualitativen Werten, Schwankungsbereichen und Verflechtungsmerkmalen) sachgerecht ausnutzen.

So wird in den Jahren 1994 bis 1998 die Landesfläche Sachsens im Maßstab 1:50000 naturräumlich kartiert (SAW 1997). Die dabei entstehenden, individuell dokumentierten physisch-geographischen Raumeinheiten mit Flächengrößen von etwa 3 bis 25 km² gehören der nach NEEF (1967a) kleinsten „chorischen Dimension" an und werden deshalb auch heute noch als „Mikro(geo)choren" bezeichnet. Sie entstehen durch Aggregierung noch kleinerer, genetisch-strukturell zusammengehöriger (nanochorischer und topischer) Raumeinheiten standort-ökologischer Kartierungen. Durch diese Vorgehensweise sind die Mikro(geo)choren insgesamt als raum-inhaltlich hart gekoppeltes Landschaftsmodell („hard coupling") anzusehen, das ein entsprechend hohes Maß an Abstraktion einschließt. Weil diese Einheiten insbesondere für die Präzisierung räumlich differenzierter Leitbilder für Naturschutz, Landesentwicklungs- und Regionalplanung vorgesehen sind, werden zur Zeit Verfahren entwickelt, um ihre Bedeutung für den Naturhaushalt zu bewerten.

Homogen sind diese Choren nur in bezug auf die Werte*verteilung* (d. h. statistischer Eigenschaften) ihrer naturräumlichen Faktoren (NEEF ET AL. 1961, HERZ 1975) und bezüglich mittelmaßstäbiger - also abstrahierter - Merkmale (z. B. Verflechtungs- und Mustertypen). Bleibt man bei der Betrachtung der bekannten topischen Eigenschaften (Bodenart, Neigung

usw.), so ist eine Heterogenität zu erkennen, die selbst jedoch wieder bestimmten Regelhaftigkeiten genügt. Obwohl es vielerlei Sonderfälle und Übergangsformen gibt, kann man in fast allen kartierten Naturräumen folgende typische „Bausteine" wiedererkennen, die am Beispiel der Mikrogeochore „Bröthener Platte" in Abbildung 3.5-1 mit kleinen Buchstaben symbolisiert sind:

a) relativ großflächige, homogene Areale in zentraler Lage, die die wesentliche Charakteristik einer Einheit bestimmen sich deutlich von jenen umgebender Choren unterscheiden, jedoch nicht flächenmäßig dominieren müssen (Kernzone)
b) inselhaft auftretende Räume stark abweichender Merkmalsausprägung mit relativ kleinem Flächenanteil, die jedoch den besonderen, individuellen Charakter eines Naturraumes ausmachen können (Singularitäten)
c) randlich gelegene Übergangsbereiche zu benachbarten Naturräumen, die allmählich immer stärker deren Eigenschaften annehmen und unter Umständen relativ große Flächenanteile (in Extremfällen summarisch bis zu 50%) einnehmen (Randzone)
d) kleinflächige, teilweise aber langgestreckte Räume vergleichbarer Eigenschaften wie in der Umgebung, die zwischen Rand- und Kernzone vermitteln und den Naturraum gliedern, jedoch nicht völlig trennen (Gliederungsareale)
e) im zentralen Bereich inselhaft auftretende Areale ähnlicher Eigenschaften wie in der Umgebung, die wegen ihrer geringen Flächengröße, geringer innere Heterogenität, fehlender Randsequenzen u. ä. nicht als eigenständige Naturräume der gleichen Rangordnung aufzufassen sind (Inselareale).

Solche Regelhaftigkeiten kann man sich zunutze machen, um Naurraumeinheiten mittleren Maßstabs - auch ohne Detailkartierungen - entsprechend ihrer inneren Struktur zu behandeln und damit nicht als „black box" ansehen zu müssen. Für viele Auswertungsfragen wäre dagegen die bloße Bearbeitung von Durchschnittswerten oder Schwankungsbreiten (die sich in bezug auf die Teilräume c-e und damit auf dem größten Teil der Fläche mit jenen der Nachbarräume überschneiden) nicht hinreichend oder gar irreführend.

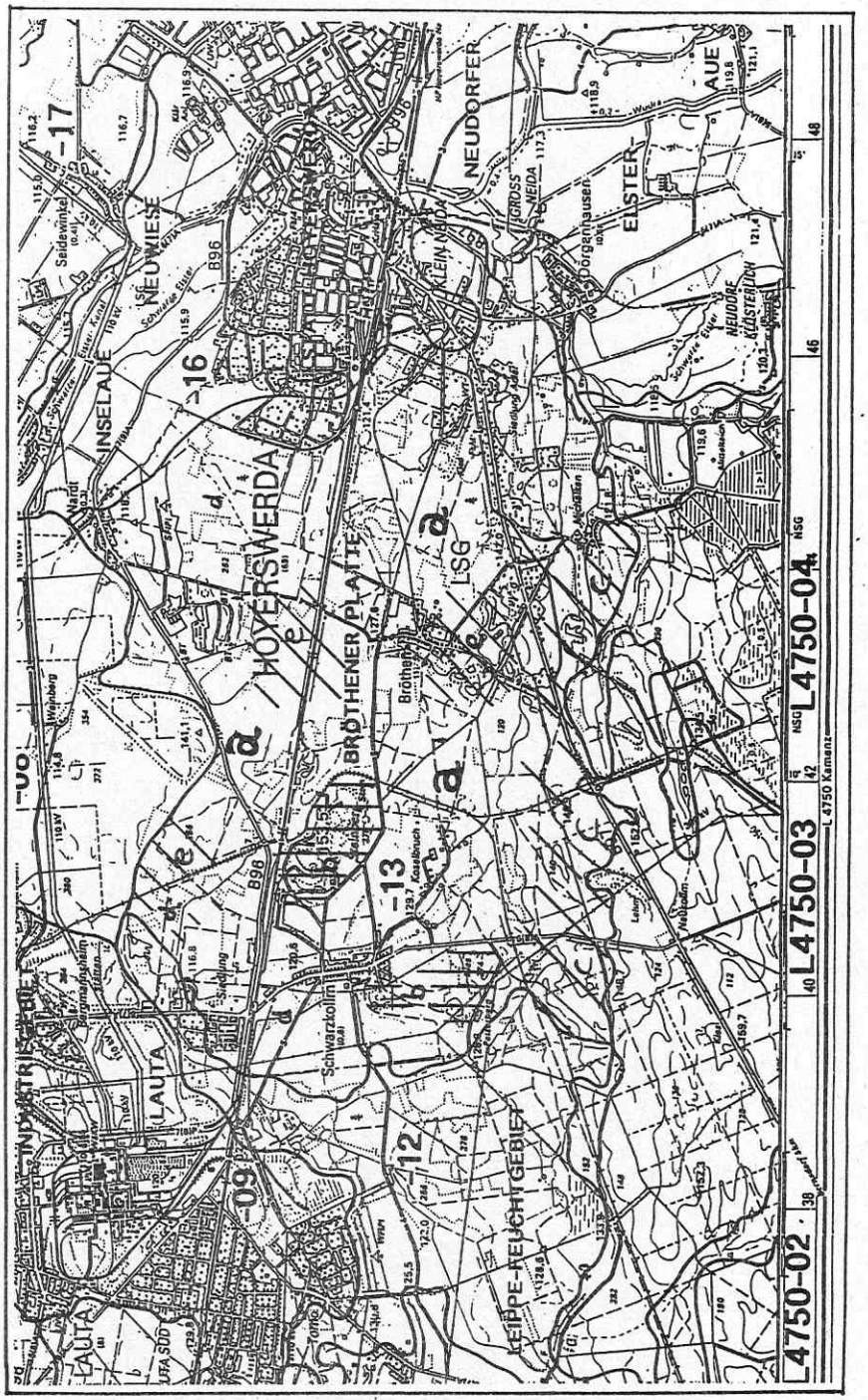


Abb. 3.5-1: Kartenausschnitt L-4550-M Hoyerswerda

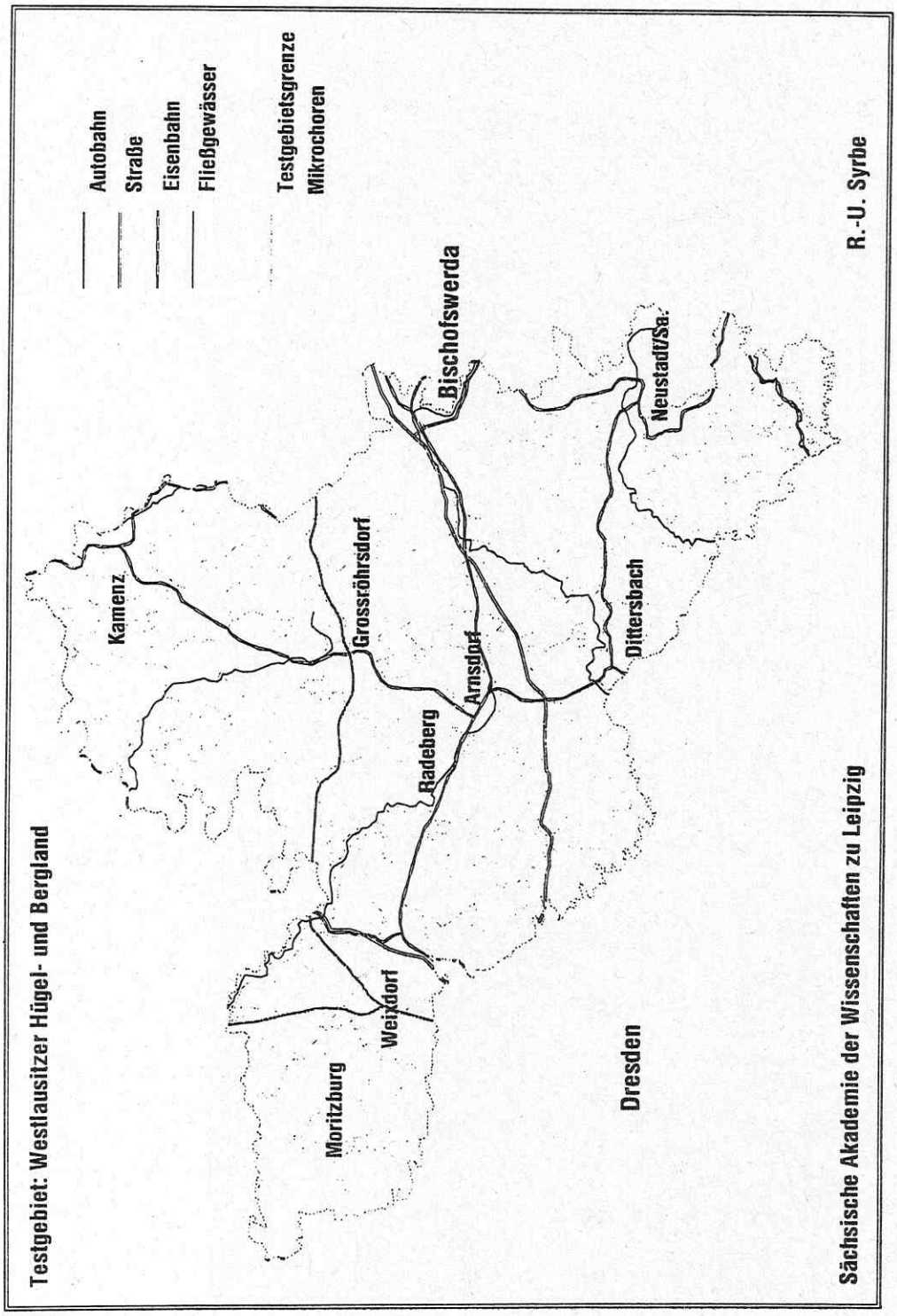


Abb. 3.5-2: Lage und Gliederung des Westlausitzer Hügel- und Berglandes

3.5.3 Die Mesogeochore „Westlausitzer Hügel- und Bergland“ als Untersuchungsgebiet

Für den Test und die kombinierte Anwendung mittelmaßstäbiger Verfahren der Landschaftsbewertung wurde eine höherrangige Einheit einer früheren naturräumlichen Gliederung (MANNSFELD & RICHTER 1995) ausgewählt, die nun mit 83 Mikrogeochoren untersetzt werden konnte (Abbildung 3.5-2).

Die in Abbildung 3.5-2 durch ihre Grenzen dargestellten Mikrogeochoren wurden jeweils als Ganzheit bewertet, wobei allerdings die maßstabsbedingte Heterogenität und die typische innere Strukturierung der Flächen Berücksichtigung fanden. Die Mesogeochore „Westlausitzer Hügel- und Bergland“ erstreckt sich über ein etwa 924 km² großes Gebiet nördlich und östlich von Dresden. Von den Moritzburger Wäldern und Teichen im Nordwesten über die fruchtbaren Lößgebiete im zentralen Teil der Westlausitzer Platte mit ihren typischen Einzelbergen und -kuppen bis an den Rand der Sächsischen Schweiz im Südosten mit steilen Tälern und hochgelegenen Agrarflächen weist dieser Raum eine große Vielfalt auf.

Die Kennzeichnung der einzelnen Mikrogeochoren erfolgte durch Daten unterschiedlicher Quellen. Zu den Informationen, die direkt zur Abgrenzung herangezogen wurden, kamen vor allem die Inhalte und Statistiken der aggregierten, niederrangigen Einheiten. Einzelne Merkmale konnten auch nach erfolgter Kartierung durch geometrische Zuordnung aus Spezialkarten übernommen werden (z. B. die Hangneigung).

Zur Darstellung wurden auf Grundlage der amtlichen Topographischen Karten 1:50000 (Normalausgabe) zunächst die Grenzen, Namen und Kurzbezeichnungen der erfaßten Naturraumeinheiten verzeichnet (s. Abbildung 3.5-1). Anstelle der Legende gehört zu jeder Mikrogeochore ein 5-seitiges Dokumentationsblatt, auf dem ihre wichtigsten Merkmale in standardisierter Form beschrieben sind (Auszug in Abbildung 3.5-5). Diese Dokumentationsblätter werden bei Bedarf mit Hilfe von Ausgabemasken aus kartenblattweise vorliegenden Datensätzen erstellt. Die Datenbank ist über die Kurzbezeichnungen im GIS an die Geometrie der digitalisierten Mikrogeochoren gekoppelt (zur Datenbankarchitektur vgl. SYRBE 1996b). Eine Auswertung der Daten für Bewertungszwecke setzt in jedem Fall eine umfangreiche Aufbereitungsarbeit voraus, dies gilt insbesondere dann, wenn Fuzzy-Ansätze einbezogen werden sollen.

3.5.4 Aufbereitung der Datenbasis und Umstrukturierung der Bewertungsverfahren für den Einsatz von Fuzzy-Logik am Beispiel des Widerstandes gegen Wassererosion

Zur Realisierung fuzzy-logischer Verknüpfungen wird ein qualitatives, ggf. unscharfes Regelwerk zugrundegelegt. Aus den in Form von Formeln, Arbeitsvorschriften, Ablaufplänen u. ä. vorliegenden Verfahren wird zunächst für jede zu bewertende Größe (manuell) eine regionale Ergebnis-Matrix erstellt, indem jede im Gebiet mögliche Merkmalskombination mit den denkbaren Spannweiten simuliert und bewertet wird. Dabei liegen bereits die Klassifikationen und Genauigkeitsgrade der vorhandenen Daten zugrunde. Jedes Feld einer solchen Matrix enthält eine - oder im unscharfen Fall mehrere - Klassennummern der meist fünf bis siebenstufigen Ergebnisskala und wird bei der Programmierung der Fuzzy-Algorithmen als eine Regel betrachtet.

Bewertungsmatrix. Aus der vereinfachten Arbeitsanleitung zur Beurteilung des Widerstandes gegen Wassererosion in MARKS et al. (1992, S. 49 ff.) und der dort genannten Literatur wurden für die Hauptklassen der im Untersuchungsgebiet auftretenden Merkmale Bewertungsmatrizen in der erforderlichen Differenziertheit erstellt. Zunächst sind hierzu nur die „natürlichen" Faktoren Hangneigung, Niederschlag und Bodenerodiblität (für eine Standard-Hanglänge) zur Bewertung der Erosionsneigung herangezogen worden, um die Gefahrenpotentiale möglicher Nutzungsänderungen - unabhängig vom jetzigen Zustand - zu kennzeichnen (Abbildung 3.5-3). Während für bestimmte Merkmalskombinationen eindeutige Aussagen getroffen werden können (im Schema links oben), werden andere unscharf bewertet. Diese nicht mehr eindeutigen Aussagen sind im Schema durch Spannweiten (kleinster Wert - größter Wert) ausgedrückt, wobei in Klammern der Schwerpunktwert hinzugesetzt wurde. Das Auftreten mehrerer Stufen ist der maßstabsbedingten Heterogenität der Mikrogeochoren bezüglich wichtiger Faktoren (Böden, Neigungen) und der Existenz weiterer, hierbei nicht exakt berücksichtigter Einflußgrößen geschuldet. Fuzzy-Bearbeitungsmethoden sind für unscharfe Bewertungsvorschriften dieser Art besonders geeignet.

In einem weiteren Schritt sollten aber auch Merkmale der derzeitigen Flächennutzung herangezogen werden, um die aktuelle Erosionsgefährdung zu ermitteln. Dem Maßstabsniveau entsprechend wurden nur drei Hauptnutzungstypen (Acker, Wald, Grünland) bewertet, für die Ackerflächen kam allerdings auch noch die repräsentative, erosiv wirksame

Hanglänge als strukturelle Größe hinzu. Das dadurch etwas komplizierte Bewertungsschema mußte im Sinne der Lesbarkeit aufgegliedert werden. Für die Ackerflächen wäre nun wegen des zusätzlichen Faktors „Hanglänge" eine vierdimensionale Matrix zu erstellen. Es wurde aber versucht, alles zweidimensional im Schema der Abbildung 3.5-4 unterzubringen. Mit Hilfe der untenstehenden Lesehilfe sollte der Inhalt trotzdem verständlich sein. Das dort angegebene Beispiel bedeutet, daß für Lehmböden (l, 3. Zeile), schwach geneigte Flächen (0,5°-3°, 1. Spalte) und Regenfaktor ca. 50 (dünn gedruckte Zahlen) die Bewertung lautet:

R-Faktor: **≈ 60** / *≈ 50* [Einzelwert gilt für beide]

Hangneigung	0.5°-3°	3°-7°	7°-16°	>16°
Bodenarten[1]				
f, ks, n, vns	1	1	2	2 - 3 (2)
s, s/g, s/l, s//l, vm, vl	1	1 - 2 (2)	**1 - 4 (2)** *1 - 3 (2)*	**2 - 5 (4)** *2 - 5 (3)*
m, m/d, m/g, m/l, m//l, l, op/d	**1-2(1)** *1*	2 - 3 (2)	3 - 5 (4)	**4 - 6 (5)** *4 - 6 (4)*
sö, sö/d, sö/l	**1 - 2 (2)** *1 - 2 (1)*	2 - 3 (2)	**2 - 6 (4)** *2 - 5 (4)*	**4 - 6 (6)** *4 - 6 (5)*
ö, p/l, ö/d, ö/g, eu	1 - 2 (2)	2 - 3 (2)	4 - 6 (5)	**6** *5 - 6 (6)*
om, om/d	1			
ol, ol/d, ou/d	1 - 2 (2)			

[1] Bodenarten nach MMK

Erosionsgefährdungsstufen: Minimum-Maximum (Schwerpunkt)

- unter 200 m Hanglänge — 1 bis 2 (Schwerpunkt bei 2)
- zwischen 200 und 350 m Hanglänge — 1 bis 3 (Schwerpunkt bei 2)
- zwischen 350 und 550 m Hanglänge — 2 bis 3 (Schwerpunkt bei 2)
- ab 550 m Hanglänge — 2 bis 3 (Schwerpunkt bei 3).

Abb. 3.5-3: Bewertungsschema der natürlichen Erosionsneigung im Untersuchungsgebiet

R-Faktor: **60** / *50*

Hangneigung	**0.5°-3°**	**3°-7°**	**7°-16°**	**>16°**
Bodenarten[1] f, ks, n, vns	**1** 1 **1** 1	**2** 2	**3 (200,450)** 3 (300,600) **3(450) - 3(200,300)** 2(250,550)-3(200,400)	**4 (200, 450)** 4 (200, 600) **4(200,450) - 5(250)** 4 (200) - 5 (300)
s, s/g, s/l, s//l, vm, vl	**2** 2	**3 (300)** 2 **2 - 4 (250)** 2 - 3 (200,350)	**5 (200)** 5 (300) **3 (200,550) - 6** 3 (450) - 6	**6** 6 **4 (200,550) - 6** 4 (250) - 6
m, m/d, m/g, m/l, m//l, l, op/d	**2 (450)** 2 (550) **1(200) - 2(200,500)** 1 (350) - 2 (200)	**4 (250)** 3 (200,450) **3 (350) - 5 (300)** 2(200,600) - 4(250)	**6** 6 **5 (450) - 6** 4 (200,600) - 6	**6** 6
sö, sö/d, sö/l	**2 (450)** 1 (200) **1(200) - 3(250,550)** 1 (350) - 3 (350)	**4 (200,450)** 3 (200) **3 (350) - 5 (200)** 2(200,600) - 5(200)	**6** 6 **5 (450) - 6** 4 (200,600) - 6	**6** 6
ö, ö/d, ö/g, ö/l, eu	**3 (350)** 3 (350) **2 - 3 (250,550)** 2 - 3 (350)	**5 (200)** 5 (400) **4(200,500) - 5(200)** 4 (250) - 5 (200)	**6** 6	**6** 6
om, om/d	**2** 2 **1 (200) - 2 (450)** 1 (350) - 2 (550)			
ol, ol/d	**2 (200,500)** 2 **1(200) - 3(250,550)** 1 (350) - 3 (550)			
ou, ou/d	**3 (250,550)** 3 (350) **2 - 3 (200,450)** 2 - 3 8350,550)			
Neigung	**< 0,5°**	Klasse 1		

[1] Bodenarten nach MMK

	Schwerpunkt	2 (550)
Erosionsgefährdungsstufen:	Minimum-Maximum	1 (350) - 2 (200)

Ab Hanglänge (...) in m gilt die jeweils nächsthöhere Stufe.

Abb. 3.5-4: Aktuelle Erosionsgefährdung für Ackerland

Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig
AG " Naturhaushalt und Gebietscharakter " Dresden

Seite 2
(L4550-13)

NATURRÄUME DES FREISTAATES SACHSEN - DOKUMENTATIONSBLATT

Bodenformen

Leitbodenformen:		Prozent	
sR-D	Sand-Rosterde bis Podsol	>20 - 40	abc
sE-L	Sand-Rostgley bis Braungley	>20 - 40	eda

Begleitbodenformen:		Prozent	
s-ksB	Sand bis Kiessand-Braunerde	> 5 - 20	cba
s-bsG	Sand bis Bändersand-Gley	> 5 - 20	eda
s/lS	Sandtieflehm-Staugley	> 5 - 20	a
sM-O	Sand-Humusgley bis Anmoorgley	> 5 - 20	de
vpB	Bergsandlehm-Braunerde	<=5	b

4.RELIEF

Mesorelief-Mosaiktyp:
Pk . Kuppige Platte
Tiefland, z.T. Hügelland (<200-250 m NN)
Zwei- oder mehrseitig durch abfallende Hänge begrenzt
SMRF: (<50 m rel. Höhe)
Dichte der Vollformen <5/km²

Mesoreliefformen: a b
Schwach geneigte Platte im Lee von Grundgebirgsdurchragungen am Innerlausitzer Hauptabbruch, Übergangsbereich zur südlich gelegenen Endmoräne mit flachen Rinnen und Senken
d e

Höhenlage: 120 - 153 m Höhenstufe: Tiefland

Neigungsflächentyp: c
2.1 Flachhängig mit ebenen Anteilen

Anteile	eben (<=1% /<0,5°)	flachhängig (>1-12% /0,5-<7°)	lehnhängig (>12-30% /7-<16°)	steilhängig (>30% />=16°)
	<40%	>60-80%	-	-
	0,2 eda	0,8 acde	0,1 bc	

5.WASSER

Hydromorphieflächentyp:
2.2 Schwach hydromorph, grundwasserbeeinflußt
Flächenanteile der Bodenfeuchteregime (BFR)-Typen

Sickerwasser-BFR	20-60%	Stauwasser-BFR	<20%
Grundwasser-BFR	20-40%	Hangwasser-BFR	<20%

HL 200m

Abb. 3.5-5: Ausschnitt (Seite 2) des Dokumentationsblattes der Mikrogeochore 4550-13 (Bröthener Platte)

Die Bewertungsstufen entsprechen zwar jenen aus MARKS et al. (1992), sind aber wegen der höheren Dimensionsstufe der Bewertungsgegenstände (komplexe Naturraumeinheiten) und der dafür vorgenommenen Adaptionen (z. B. Einarbeitung der Hanglängen, Außerachtlassung der Wölbungen) nicht mit den dort angegebenen Abtragsmengen quantitativ in Verbindung zu bringen. Es werden also nicht metrische Abtragswerte für bestimmte Einzelschläge berechnet, sondern Anhaltspunkte für die generelle Gefährdung der Raumeinheiten im Verhältnis untereinander anhand ihrer größten bzw. kritischsten Hänge gegeben.

Scharfe Eingangsdaten

Unter den fünf Faktoren gingen Niederschlagswerte und Hanglängen als scharfe Werte ein. In der Attributdatei der zu bewerteten Mikrogeochoren existieren also zwei separate Spalten mit je einer genauen Niederschlags- bzw. Längenangabe. Zur Ermittlung der *Regenerosivität* wurden die Niederschlagswerte nahegelegener Stationen des Deutschen Wetterdienstes ausgewertet, um nach bekannten Formeln den R-Faktor zu schätzen. Zusätzlich konnten aus den Dokumentationsblättern der Naturraumkartierung ggf. Angaben über besonders niederschlagsreiche bzw. gewittergefährdete Gebiete entnommen werden. Aus beiden Faktoren wurde im Sinne einer einfachen Alternativentscheidung bestimmt, ob die regenreichere (R≈60) oder die regenärmere (R≈50) Bewertungsvariante herangezogen werden sollte.

Die *Hanglängen* wurden anhand der Topographischen Karte 1:25000 für die größten auftretenden Flächen (ohne Berücksichtigung der im Bearbeitungsraum wenig wirksamen Schlaggliederung) gemessen, wobei nur horizontalkonkave bis -gestreckte Hänge und diese auch nur bis zum Beginn des (im Isohypsenbild erkennbaren) Vertikalkonkavbereiches am Hangfuß einbezogen wurden. Die Längenmessung erfolgte ausschließlich auf ununterbrochen kartierten Ackerflächen (und endet jeweils am Hecken-, Vorflut- bzw. Wegenetz sowie an Grün-, Wald- oder Siedlungsflächen). Obwohl konkrete Einzelaussagen damit sicherlich kritisch anzusehen sind, dürften mit dieser Erfassungsweise weitgehend repräsentative Daten gewonnen worden sein, die die maximalen Risiken beschreiben.

Über diese Ermittlungsweise repräsentativ-erosiver (!) Hanglängen wird auch die *Wölbung*ssituation indirekt berücksichtigt. Wegen der Vielgestaltigkeit möglicher Hangsituationen in den - mehrere Quadratkilometer großen - Mikrogeochoren ist eine

explizite Erfassung unterschiedlicher Wölbungsmaße im mittleren Maßstab dagegen grundsätzlich abzulehnen.

Fuzzy-Eingangsdaten

Hinsichtlich der Faktoren Bodenart, Hangneigung und Flächennutzung werden die Mikrogeochoren anhand der Beschreibung in den Dokumentationsblättern typisiert. Die Zugehörigkeit einer einzelnen Naturraumeinheit zu einer Merkmalsklasse ist jedoch wegen derer teilweise unscharfen Charakteristik (z. B. mittels Bodenformenkombinationen aus der MMK) und wegen der Heterogenität nur mit einem Möglichkeitswert beschreibbar. Die Eingabe der Werte erfolgt in drei gesonderten Dateien, die mit je einer Zeile pro Mikrogeochore durch ein Fuzzy-Set ihre Zugehörigkeitswerte zu den unterschiedlichen Neigungs-, Boden- bzw. Nutzungsklassen ausweisen. Für jede Klasse existiert genau eine Tabellenspalte, in der die Möglichkeitswerte (gebrochene Zahlen zwischen null und eins) enthalten sind.

Tabelle 3.5-1 zeigt als Beispiel den Ausschnitt eines solchen Fuzzy-Datensatzes für das Merkmal Flächennutzung. Das Maß, mit dem die jeweilige Fläche einer bestimmten Flächennutzungsklasse zuzurechnen ist, kann in diesem Fall mit Hilfe der auftretenden Anteile zugehöriger Nutzungsformen geschätzt (aufgerundet) werden. So wird beispielsweise die Mikrogeochore „494624" (d.h. die Einheit mit der laufenden Nummer 24 auf dem Kartenblatt 1:25000 Nummer 4946), deren Wald-, Forst-, Gebüsch-, Aufforstungs- und sonstige gehölzbestandene Flächen sich zu ca. 76% addieren mit dem Möglichkeitswert 0.8 der Klasse Wald/Forst zugeordnet.

Im Falle der Bodenkennzeichnung war diese Art der Fuzzifizierung etwas komplizierter, weil nicht nur die räumliche Heterogenität der Naturräume oder die Lückenhaftigkeit der Unterlagen sondern auch die begriffliche Inhomogenität der forst- und landwirtschaftlichen Standortskartierungen vom Bearbeiter individuell berücksichtigt werden mußte.

Über die Kurzbezeichnungen (im Beispiel: 494624) sind die Datensätze nun bei Bedarf an die Originaldatei zu koppeln um so gemeinsame Bewertungen vorzunehmen.

Tab. 3.5-1: Auszug aus der Fuzzy-Merkmalsdatei zur Hangneigung des Untersuchungsgebietes Westlausitz

Mikroch.	Acker	AZ	Forst	FZ	Grünl.	GZ	Siedl.	SZ	Wasser	WZ	Ind.	IZ
494841	0.2	bc	0.9	a3bc	0.0		0.0		0.0		0.1	c
494839	0.4	ab	0.4	b	0.1	a	0.1	a	0.1	a	0.0	
494838	0.1	d	0.8	abc	0.0		0.2	d	0.0		0.0	
494837	0.5	abc	0.4	b	0.1	c	0.2	c	0.0		0.0	
494836	0.2	a	0.2	ca	0.4	cdb	0.2	bc	0.0		0.0	
494624	0.1	cdef	0.8	abc	0.1	cdef	0.0		0.2	d	0.0	
494625	0.1	a	0.8	abcd	0.1	cd	0.1	a	0.0		0.0	

Die Besonderheit heterogener Einheiten ist, daß auch ein als typisch erkanntes Merkmal nicht auf der gesamten Fläche gleichermaßen zutrifft. Um räumliche Merkmalsverknüpfungen automatisch überprüfen zu können, wurden verschiedene Ansätze getestet. Als effektivste Vorgehensweise erwies sich die Codierung der Merkmalsklassen mit den Kennbuchstaben für die Teilareale ihres Auftretens, wie sie am Beispiel der Bröthener Platte vorgestellt wurden. Um dafür nicht neue, differenziertere Struktureinheiten ermitteln zu müssen, wurde auf das Georelief als Ordnungsparameter zurückgegriffen. Wie der Ausschnitt eines Mikrogeochoren-Dokumentationsblattes in Abbildung 3.5-5 zeigt, sind dort die auftretenden Mesoreliefformen in meist ungeordneter Reihenfolge erwähnt und teilweise beschrieben. Diese hier aufgezählten Elemente wurden nun markiert und durchnumeriert. Da dem Bearbeiter bei der Abfassung dieses „Prosatextes" keine Vorschriften auferlegt waren, ist die Reihenfolge bei anderen Mikrogeochoren nicht mit den Bautypen in der Aufzählung unter 2. identisch. Allerdings konnte in jedem Fall mit diesen Kennbuchstaben auch die differenzierten Merkmalsstufen in bezug auf ihre jeweiligen Lageeigenschaften gekennzeichnet werden. Dabei ist besonders die Weglassung entscheidend, was bedeutet, daß in unserem Beispiel die Sand-Rosterden (abc) nicht in Rinnen (d) oder Senken (e) und dagegen die Rost- und Braungleye (eda) nicht auf den Bergen (b) oder dem Endmoränenrandgebiet (c) vorkommen. Oft können solche Zuordnungen auch ohne weitere Detailerkundung (zumindest grob) vorgenommen werden. Wie in Tabelle 3.5-1 zu sehen ist, werden diese Lagecodes dann für jede Merkmalsklasse in einer zweiten Spalte neben den Möglichkeitswerten erfaßt. Ein Bewertungsprogramm kann nun durch String-Vergleich räumlich korrelierende Merkmale erkennen oder ausschließen.

3.5.5 Besonderheiten bei der unscharfen Bewertung heterogener Räume

Durch Anwendung eines speziellen Fuzzy-Entscheidungssystems kann aus den zusammengestellten Daten und der Bewertungsmatrix eine Auswertung erfolgen. Dabei bekommt jede Raumeinheit ein neues Fuzzy-Set zugewiesen, das ausdrückt, inwieweit die einzelnen Bewertungsstufen für sie zutreffen. Wie schon angedeutet wurde, birgt aber die bloße Kombination derartig verallgemeinerter Merkmale (ohne Berücksichtigung der Lagebezüge) Fehlerquellen, die eine Pauschalbewertung der Einheiten in Frage stellen. Während etwa eine landwirtschaftlich geprägte Fläche mit größeren Neigungen stark erosionsgefährdet sein müßte, finden sich an den steilsten Hängen einer Bewertungseinheit möglicherweise gerade Waldinseln, so daß die tatsächlichen Probleme überschätzt würden. Derartige raumtypische Lagebeziehungen wurden also in der Bewertung berücksichtigt, zumal eine solche strukturelle Betrachtung gerade zu den Stärken des Naturraumtypen-Ansatzes gehören sollte. Hierzu ist die Bewertung solcher Merkmalskombinationen aus dem Verfahren auszuschließen (oder mit geringeren Möglichkeitswerten zu unterdrücken), die nicht bzw. kaum gemeinsam auftreten, d. h. keine gemeinsamen Punkte (Inzidenz) besitzen. Da diese Überprüfung für jede Einheit individuell durchgeführt werden muß, ist hierfür ein dynamischer Operator vonnöten. Ein solcher Inzidenzoperator erhält als Eingangswerte die Positionsnummern des ersten Auftretens gleicher Kennbuchstaben nach dem bereits besprochenen String-Vergleich der Lagecodes aller beteiligten Faktoren (wenn keine Inzidenz vorliegt: Null). Die Grundform müßte also eine Signumfunktion sein, die im mehrdimensionalen Fall auch angewendet wird. Da Signum von ARC/INFO als Funktion nicht angeboten wird und daher ohnehin „gebastelt" werden mußte, wurde für die zweidimensionale Problematik die Funktion

$$I = 2\sqrt{x}/(x+1) \qquad (Gl.1)$$

verwendet. Diese ergibt für Null und Eins die gleichen Werte wie Signum, für höhere Positionsnummern sinken ihre Werte jedoch langsam wieder ab, so daß schwächere Lagekorrelationen bei entsprechender Positionierung der Kennbuchstaben auch geringer gewichtet werden. Die Formel ist folgendermaßen variierbar; wenn ein schwächerer Abfall bevorzugt wird (weil auch nachgenannte Positionen höher bewertet werden sollen), wäre

$$I = 3\sqrt{x}/(x+2) \qquad (Gl.2)$$

geeignet. Ein Operator nach Gleichung (2) ist etwas optimistischer und vermittelt damit stärker zur Signumfunktion.

Abb. 3.5-6: Programmausschnitt zur Fuzzy-Bewertung mit dynamischer Inzidenz und Maximumaggregation

Bewertungsschritte

1. Auswahl des Gültigkeitsbereiches einer Regel, d.h. eines Tabellenfeldes

   [Schleife zur Einzelbearbeitung jedes Datensatzes]

2. Ermittlung des lagebezogenen Inzidenzwertes "z" (für "Zuordnung")

3. Berechnung der Kompatibilitäten (Minima) und der Inferenzwerte "e" und "p"

4. Auswahl der niederschlagsarmen Areale und Zuweisung der Erosionswerte (hier: Maximumaggregation)

5. Auswahl der niederschlagsreichen Areale und ihre Bewertung

   [Schleifenende]

Programmbeispiel

```
sel all
res N2 > 0
res SOE > 0
cursor open
&do &while %:edit.AML$NEXT%
&s z = [calc [search %:edit.N2Z%
%:edit.SOEZ%] * [search %:edit.SOEZ%
%:edit.N2Z%]]
&s y = [calc [sqrt %z%] * 2]
&s q = [calc %z% + 1]
&s e = [calc [calc [min %:edit.SOE%
%:edit.N2%] * %y%] / %q%]
&s p = [calc %e% / 2]
&if %:edit.NSW% < 260 &then &do
ca EROS1 = [max %:edit.EROS1% %e%]
ca EROS2 = [max %:edit.EROS2% %p%]
&end
&if %:edit.NSW% > 260 &then &do
ca EROS2 = [max %:edit.EROS2% %e%]
ca EROS1 = [max %:edit.EROS1% %p%]
&end
cursor next
&end
cursor close
```

Es wird eine einfache Fuzzy-Inferenzstrategie (vgl. Kapitel. 2.5.) eingesetzt, die den Übergang zwischen linker und rechter Regelseite durch eine Kombination des dynamischen Inzidenzoperators mit der Zuordnungsunschärfe der Bewertungsmatrix vollzieht. Die Umsetzung erfolgt durch ein AML-Programm (von „Arc Macro Language", der Arc/Info-Programmiersprache) wie das Schema in Abbildung 3.5-6 zeigt.

3.5.6 Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse

An dem mit drei Faktoren vergleichsweise einfachen Bewertungsverfahren der natürlichen Erosionsneigung wurden Programmvarianten unterschiedlicher Operatorenkombination mit und ohne Berücksichtigung der Lagespezifika getestet. Eine Ergebnisauswahl für vier Beispielsflächen soll in den Tabellen 3.5-2 bis 3.5-6 die wichtigsten Unterschiede demonstrieren.

Darin handelt es sich zunächst um zwei Mikrogeochoren im Nordwesten des Untersuchungsgebietes. Das „Kleinkuppengebiet Friedewalder Forst" (493625) liegt auf sandig-lehmigen Böden eines flachen Plateaus östlich von Weinböhla. Das südlich angrenzende „Friedewald-Lindenauer Kleinkuppengebiet" (494627) weist dagegen neben einer starken Zersiedlung auch verschiedene Ackerflächen auf und verfügt über steilere Hänge zum benachbarten Elb- bzw. Lößnitztal. Im äußersten Südosten des Untesuchungsgebietes, an der Grenze zur Sächsischen Schweiz gelegen, finden sich die zwei anderen Beispiels-Mikrogeochoren, die sich u. a. durch stärkere Niederschläge im Gebirgsstau von den ersteren unterscheiden. Das hoch gelegene „Lichtenhainer Granit-Riedelgebiet" (515046) wird überwiegend von Ackerflächen eingenommen und verfügt nur über mittlere Neigungen. Dagegen zeichnet sich das „Mittlere Sebnitz-Tal" (515045) durch außerordentlich steile Felshänge aus, die bis zum Talgrund mit Wald bestanden sind.

Die Ergebnisse sind Fuzzy-Sets mit Möglichkeitswerten für die Bewertungsklassen EROS-1 (keine Erosionsdisposition) bis EROS-6 (sehr hohe Erosionsdisposition). Zum Vergleich mit den Ergebnissen verschiedener Verfahrensvarianten wurden sie nach der summarischen Schwerpunktmethode, wie folgt, defuzzifiziert:

$$EROS = \Sigma\mu(y) * y / \Sigma\mu(y) \qquad (Gl.3)$$

mit den Möglichkeitswerten $\mu(y)$ der Wertstufe y, summiert über alle sechs Stufen.

Das defuzzifizierte Ergebnis (EROS) steht jeweils in der letzten Spalte, ist wegen seines Skalenniveaus allerdings nicht mehr mit den Klassen 1 bis 6 identisch. Zu Vergleichszwecken müssen deshalb vor allem die relativen Positionen ($RECNO) der einzelnen Mikrogeochoren hinsichtlich ihrer Erodiblität herangezogen werden, die bei einer Sortierung anhand der EROS-Werte zustande kamen.

In Tabelle 3.5-2 sind die Ergebnisse einer Bewertung ohne Inzidenzoperator dargestellt. Die Aggregation der Fuzzy-Möglichkeitswerte für mehrere gleichzeitig „feuernde" Regeln einer Klasse erfolgte hierbei schrittweise durch algebraische Summation nach der Formel:

$$A = \mu(a) + \mu(b) - \mu(a)*\mu(b) \qquad (Gl.4),$$

wobei μ wiederum die Möglichkeitswerte der Regeln bzw. Zwischenergebnisse a und b sind.

Tab. 3.5-2: Bewertung der natürlichen Erosionsneigung ohne Lagekorrektur, Aggregation Summen

$RECNO	MIC	EROS-1	EROS-2	EROS-3	EROS-4	EROS-5	EROS-6	EROS
11	494625	0.9	0.8	0.2	0.0	0.0	0.0	1.160
30	494627	1.0	0.9	0.5	0.2	0.1	0.0	1.714
78	515046	0.4	0.9	0.7	0.6	0.5	0.5	3.424
80	515045	0.6	0.7	0.4	0.6	0.4	0.5	3.703

Es resultieren mehrere hohe Möglichkeitswerte, da sich hier viele kleinere Beträge aufsummieren. Erwartungsgemäß sind die beiden niederschlagsärmeren Mikrogeochoren aus dem Friedewalder Gebiet gut bewertet worden, während das außerdem steilhängigere Gebirgsvorland schlechte Noten bekam.

Tabelle 3.5-3 zeigt ebenfalls Resultate einer Bewertung ohne Lagekorrektur, wobei von den Ergebnissen der ausgeführten Regeln jeweils nur die Möglichkeitsmaxima übernommen wurden. Da alle - im Vergleich zu den jeweiligen Klassenmaxima - kleineren Zugehörigkeitswerte keine Berücksichtigung fanden, sind die absoluten Ergebnisse insgesamt niedriger, was durch Normierung jedoch angeglichen werden könnte. Aber auch bei relativer Betrachtung sind Differenzen feststellbar. Während das Granit-Riedelgebiet (515046) durch Beibehaltung seines Schwerpunktes zwei Positionen gewinnen konnte, werden die anderen Beispielsflächen deutlich schlechter bewertet, was sich in der Rangfolge besonders stark für die zwei nordwestlichen Mikrogeochoren auswirkt. In dieser Variante zeigt sich jetzt nur das

Verhalten der bestimmenden (Leit-)Merkmalskombinationen, während vordem die Summe der kleineren, eventuell auch weniger typischen Fälle das Ergebnis beeinflussen konnte.

Tab. 3.5-3: Bewertung der natürlichen Erosionsneigung ohne Lagebeziehungen, Aggregation Maxima

$RECNO	MIC	EROS-1	EROS-2	EROS-3	EROS-4	EROS-5	EROS-6	EROS
18	494625	0.4	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	1.706
41	494627	0.4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.0	2.400
76	515046	0.1	0.5	0.3	0.4	0.2	0.2	3.424
81	515045	0.2	0.3	0.2	0.4	0.3	0.4	3.914

Die folgenden zwei Tabellen (Tabelle 3.5-4 und Tabelle 3.5-5) stellen dem die Bewertungen mit dynamischen Inzidenzoperatoren in den gleichen Aggregationsvarianten gegenüber. Zunächst fällt auf, daß hinsichtlich der absoluten Höhe der Möglichkeitswerte nur geringe (negative) Veränderungen eintreten, wobei der Unterschied zwischen Summen und Maxima natürlich erhalten bleibt. Wie dieser geringe numerische Einfluß des Inzidenzoperators zeigt, ist die Ausblendung der lagemäßig unzutreffenden Merkmalskombinationen nur bei einem kleinen Teil der Fuzzy-Operationen spürbar.

Tab. 3.5-4: Bewertung der natürlichen Erosionsneigung mit dynamischem Inzidenzoperator, Aggregation Summen

$RECNO	MIC	EROS-1	EROS-2	EROS-3	EROS-4	EROS-5	EROS-6	EROS
4	494625	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.200
16	494627	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	1.571
78	515046	0.1	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	3.495
82	515045	0.1	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	3.881

Tab. 3.5-5: Bewertung der natürlichen Erosionsneigung mit dynamischem Inzidenzoperator, Aggregation Maxima

$RECNO	MIC	EROS-1	EROS-2	EROS-3	EROS-4	EROS-5	EROS-6	EROS
3	494625	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.146
21	494627	1.0	0.9	0.4	0.0	0.0	0.0	1.737
77	515046	0.3	0.8	0.6	0.6	0.5	0.4	3.406
82	515045	0.3	0.6	0.4	0.5	0.4	0.4	3.578

Für die Bewertungsaussage ist jedoch das Verhältnis der ausgewiesenen Wertstufen untereinander entscheidend, wo diese feinen Unterschiede doch zu erheblichen Verschiebungen führen. Relativ werden nun die nordwestlichen Mikrogeochoren besser bewertet. Hier wirkt es sich also aus, daß vermehrt ungünstige Merkmalskombinationen von

der Bewertung ausgeschlossen wurden. Daß dies nicht generell der Fall ist, zeigt die deutlich verbesserte Plazierung dieser Einheiten. Besonders interessant ist aber, daß die Unterschiede zwischen beiden Aggregationsvarianten (Summen- oder Maximumoperator) deutlich geringer ausfallen als beim ersten Tabellenpaar. Vergleicht man hier die Rangordnungen, so ergibt sich nur für das Kleinkuppengebiet ein Unterschied von mehr als einem Platz. Daß diese Bewertungsmethode sich letztlich gegenüber einer (technischen) Operatorvariation robuster verhält, darf neben der plausibleren inhaltlichen Konfiguration als statistisches Qualitätsmerkmal gelten.

Bezieht man die Flächennutzung zur Bewertung einer aktuellen Erosionsgefahr (Tabelle 3.5-6) mit ein, so ändert sich das Bild natürlich grundlegend. Das kaum ackerbaulich genutzte Sebnitztal rückt auf einen Platz im Mittelfeld vor, während das Lichtenhainer Granit-Riedelgebiet trotz geringerer Neigungen zum absoluten Schlußlicht der insgesamt 83 bewerteten Einheiten wird.

Auch die etwas feinere Struktur der Ackerflächen, gemeinsam mit den natürlich kürzeren Hanglängen, wirkt sich deutlich aus und führt zu einer Plazierung des Friedewald-Lindenauer Kleinkuppengebietes unter den ersten zehn.

Tab. 3.5-6: Bewertung der aktuellen Erosionsgefährdung mit dynamischem Inzidenzoperator, Aggregation Summen

$RECNO	MIC	EROS-1	EROS-2	EROS-3	EROS-4	EROS-5	EROS-6	EROS
4	494625	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	1.502
8	494627	1.0	0.8	0.3	0.2	0.0	0.0	1.891
51	515045	0.3	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	3.111
83	515046	0.1	0.5	0.5	0.7	0.6	0.9	4.171

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach einer Einbeziehung der natürlichen Hanglänge bei der Bewertung der potentiellen Erosionsneigung, wie etwa bei GÜNDRA et al. (1995). Obwohl dieser Vorschlag theoretisch als zwingend erscheint, gelten damit gewonnene Ergebnisse praktisch nur bei vollständiger Entwaldung und Entsiedlung aller Flächen sowie ohne jegliche Zerschneidung, etwa durch Verkehrswege.

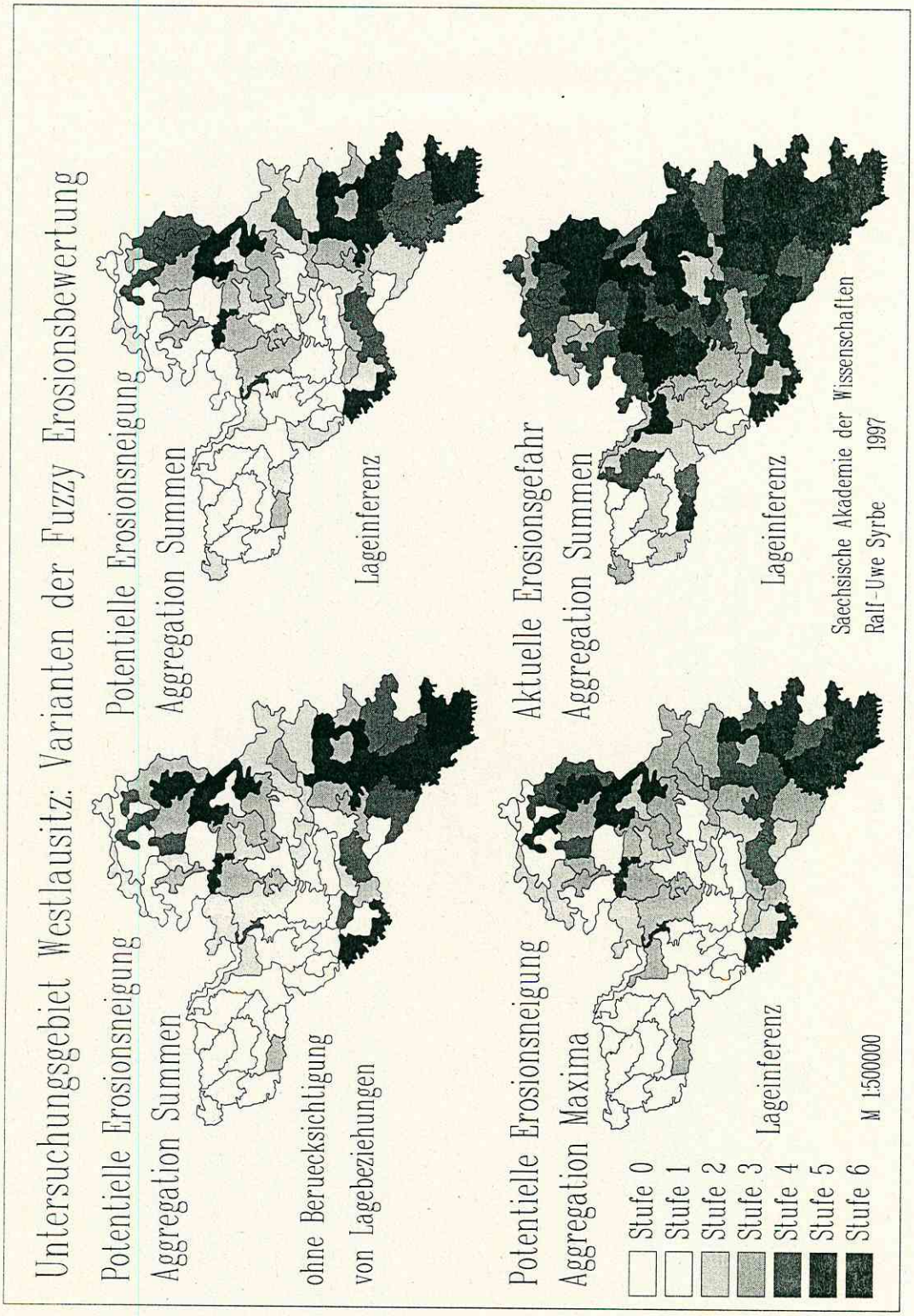


Abb. 3.5-7: Erosionsbewertung im Untersuchungsgebiet Westlausitz, Varianten mit und ohne Lageinferenz

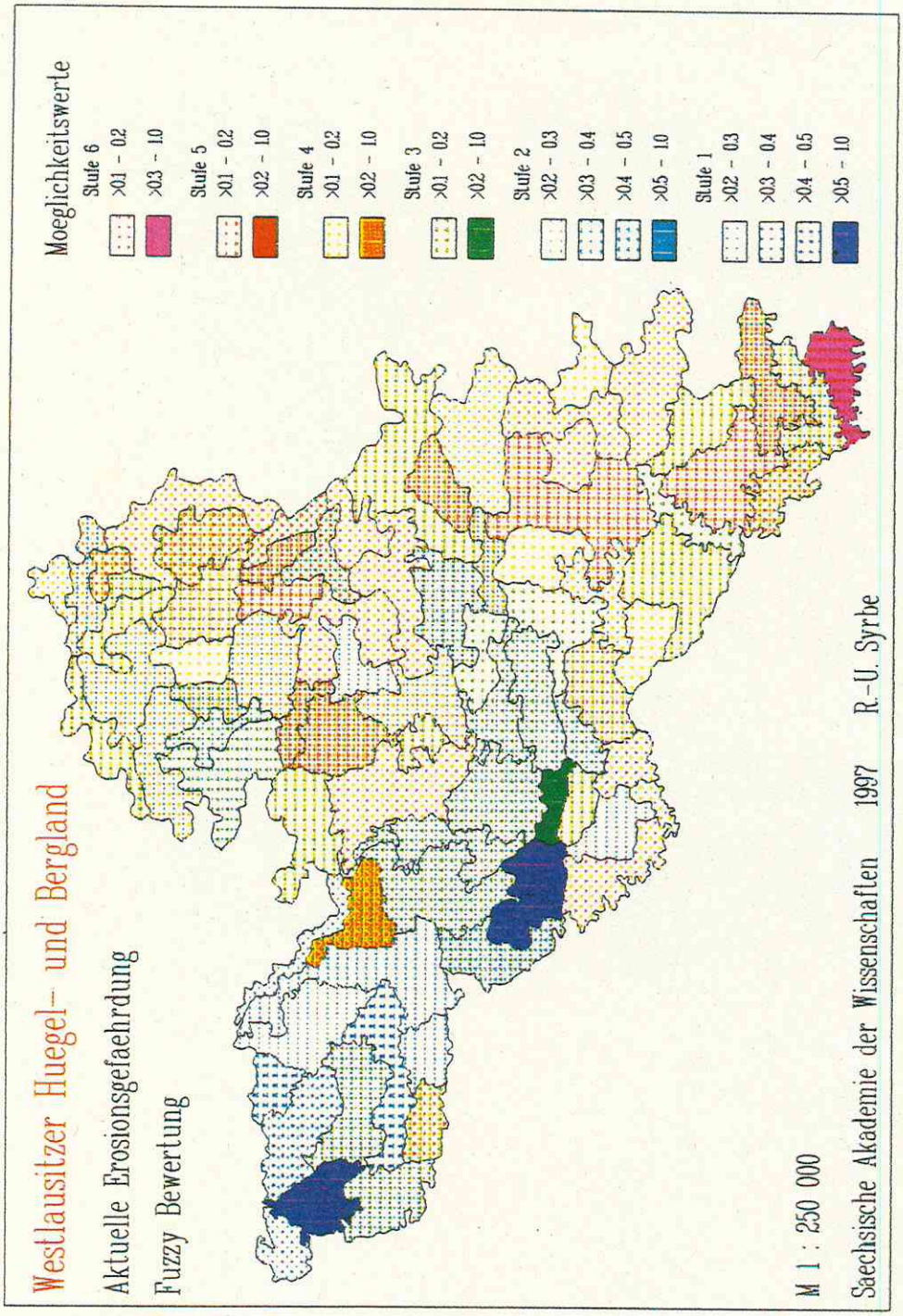


Abb. 3.5-8: Erosionsbewertung im Untersuchungsgebiet Westlausitz, Darstellung mit Fuzzy-Möglichkeitswerten

Solche Konfigurationen sind jedoch selbst als Annahme für den ungünstigsten Fall schwer vorstellbar und damit für die Planung und Gestaltung unserer heutigen Landschaft zu abstrakt. Außerdem ergeben sich methodische Probleme bei einer Einbeziehung und Differenzierung natürlicher Hanglängen einerseits und künstlich-natürlicher Ackerprofillängen andererseits, so daß die oben dargestellte Variante bevorzugt wurde.

Für die kartographischen Darstellung kann nun entschieden werden, ob eine übersichtliche Gegenüberstellung der defuzzifizierten Ergebnisse aller Klassen gewünscht wird, wobei natürlich die vielfältigen Informationen der Fuzzy-Daten über Schwankungsbreiten, Aussageschärfe und Feinabstufung unterdrückt werden müßten. Abbildung 3.5-7 zeigt die Ergebnisse von vier der oben diskutierten Bewertungsvarianten in dieser Darstellungsweise. Hierzu wurde die Skala der defuzzifizierten Werte in sieben Abschnitte segmentiert. Die Klassengrenzen wurden aus der Verteilung der Ergebniswerte ermittelt und stimmen damit ausdrücklich nicht mit den (sechs) Bewertungsstufen überein. Die Grauwert/Farbverteilung vermittelt also grob die bereits besprochene relative Plazierung.

Neben einer feineren Skalierung kann insbesondere die Darstellung der Möglichkeitswerte einzelner Klassen den Informationsgehalt erhöhen. Dabei ist es allerdings schwieriger, einen geeigneten Kompromiß zwischen Übersichtlichkeit, Lesbarkeit und Informationsgehalt zu finden. Einerseits könnte für jede der sechs Klassen eine Einzeldarstellung erfolgen, die eine analytische Auswertung erlaubte. In ihrer Gesamtaussage besser erfaßbar ist jedoch eine farbig-kombinierte Darstellung der Werte aller Klassen wie in Abbildung 3.5-8. Dazu mußte sowohl eine Normierung als auch die gröbere Klassifizierung der Möglichkeitswerte in Kauf genommen werden. Wie mehrere Kollegen inzwischen bestätigten, ist eine solche Darstellung (gerade noch) zu lesen und anhand des Gesamt-Farbeindruckes auch in der Übersicht erfaßbar. Schwarz-Weiß-Karten in einer solchen Kombination sind bisher jedoch noch nicht gelungen.

3.5.7 Zusammenfassung

Im Rahmen eines geographischen Informationssystems (ARC/INFO) wird eine Methodik vorgestellt, die bereits bekannte Bewertungsverfahren aufgreift und durch Kombination mit Fuzzy-Ansätzen eine Verarbeitung unscharfer Daten und Regeln ermöglicht. Die Methodik erlaubt durch Berücksichtigung relativer Lagebeziehungen unterschiedlicher Indikatoren mit

Hilfe eines dynamischen Fuzzy-Operators auch eine Bewertung diesbezüglich heterogener Räume. Dabei bestimmt nicht nur die Sicherheit der eingehenden Daten und die Logik ihrer Aggregation die Schärfe der Ergebnisse, sondern auch typische Inzidenzmerkmale innerhalb der bewerteten Areale.

Fuzzy-Sets werden zur Merkmalsbeschreibung von thematisch abgegrenzten Landschaftsausschnitten und -typen eingesetzt. Auf diese Weise wird unscharfes Wissen direkt implementierbar, wobei für die einzelnen Faktoren nicht nur gemittelten Werte zugrundegelegt werden, sondern ihre Verteilung insgesamt erfaßbar ist. Die Ausführung der fuzzylogischen Operationen erfolgt durch Programme der systemeigenen Makrosprache „AML".

Literatur

AG BODEN (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden) (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. ber. Aufl., Hannover, 392 S.

ALTMAN, D. (1994): Fuzzy set theoretic approaches for handling imprecision in spatial analysis. International Journal of Geographical Information Systems 8, S. 271-289.

ANDERS, V. (1997): Das Umweltinformationssystem des Kreises Merseburg-Querfurt. In: GEOLOGISCHES LANDESAMT SACHSEN-ANHALT (Hrsg.): Workshop "Digitale Geowissenschaftliche Daten - Bedarf, Nutzung, administrative Regelungen". Tagungsband, Halle, S. 13-14.

ARBEITSGRUPPE FREIBURG (1974): Untersuchung der klimatischen und lufthygienischen Verhältnisse der Stadt Freiburg i. Br. Arbeitsbericht. Freiburg, 107 S.

ARENS, H. (1960): Die Bodenkarte 1:5000 auf der Grundlage der Bodenschätzung, ihre Herstellung und ihre Verwendungsmöglichkeiten. Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen 8, 164 S.

AZAR, C. & T. STERNER (1996): Discounting and distributional considerations in the context of global warming. Ecological Economics 19, S. 169-184.

BANAI-KASHANI, A.R. (1990): Dealing with uncertainty and fuzziness in development planning: a simulation of high-technology industrial location decisionmaking by the analytical hierarchical process. Environment and Planning 22, S. 1183-1204.

BARSCH, D. ET AL. (1978): Das GMK Musterblatt für das Schwerpunktprogramm geomorphologische Detaikartierung in der Bundesrepublik Deutschland. Berliner Geogr. Abh. 30, S. 7-19.

BARSCH, D. & H. RICHTER (1983): Geowissenschaftliche Kartenwerke als Grundlage einer Erfassung des Naturraumpotentials. Forschungen zur Deutschen Landeskunde 220, Trier, 206 S.

BARSCH, H. & G. SAUPE, (Hrsg.) (1994): Bewertung und Gestaltung der naturnahen Landschaft in Schutzgebieten, Erholungs- und Freizeitgebieten. Potsdamer Geogr. Schriften 8, 1 (134 S.) und 2 (107 S.).

BARSCH, H. & G. SCHÖNFELDER (1983): Landscape Diagosis as a Geographical Contribution to Landscape Management. GeoJournal 7, 2, S 161-166.

BASTIAN, O. (1991): Biotische Komponenten in Landschaftsforschung und Planung. Probleme ihrer Erfassung und Bewertung. Habil.-Schr., Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg, 240 S.

BASTIAN, O. & K.-F. SCHREIBER (Hrsg.) (1994): Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft. Umweltforschung, G. Fischer Verlag Jena, Stuttgart, 502 S.

BASTIAN, O. & M. RÖDER (1996): Beurteilung von Landschaftsveränderungen anhand von Landschaftsfunktionen. Naturschutz und Landschaftsplanung 28, 10, S. 302-312.

BECHMANN, A. (1977): Ökologische Bewertungsverfahren in der Landschaftsplanung. Landschaft + Stadt 9, S. 170-182.

BECHMANN, A. (1978): Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung. Verlag Haupt Bern, Stuttgart, 361 S.

BERGSTRÖM, J.C., BOYLE, K.J., JOB, C.A. & M.J. KEALY (1996): Assessing the Benefits of Groundwater for Environmental Policy Decisions. Journal of the American Water Resources Ass. Vol. 32, No. 2, S. 279-291.

BISCHOF, T. ET AL. (1974/75): Verbesserte Beurteilung landwirtschaftlicher Flächen in der Agrar- und Landschaftsplanung. Berichte über die Landwirtschaft 52, S. 547-557.

BLASCHKE, T. (1997): Unschärfe und GIS: „Exakte" Planung mit unscharfen Daten? In: SCHRENK, M. (Hrsg.): Computergestützte Raumplanung - Beiträge zum Symposium CORP 1997. TU Wien, S. 39-51.

BJORKE, J.T. (1995): Fuzzy Set Theoretic Approach to the Definition of Topological Spatial Relations. In: ScanGIS '95 - Proceedings of the 5th Scandinavian Research Conference on GIS, Trondheim, S. 197-206.

BLONDA, P.N., PASQUARIELLO, P.N., LOSITO, S., MORI, A., POSA, F. D. & RAGNO (1991): An experiment for the integration of multitemporal remotely sensed images based on fuzzy logic approach. International Journal of Remote Sensing 12, S. 463-476.

BMU (1996): Nachhaltigkeit in der Wasserwirtschaft. Memorandum des Internationalen Symposiums am 8. und 9. Oktober 1996 in Bonn. Umwelt 11/96, Bonn, S. 385-386.

BÖHME, G. (1993): Fuzzy-Logik. Springer Berlin, 315 S.

BRAHE, P. (1972): Matrix der natürlichen Nutzungseignung einer Landschaft bei der Auswertung landschaftsökologischer Karten für die Planung. Landschaft + Stadt 4, S. 133-141.

BUCHWALD, K. & W. ENGELHARDT (Hrsg.) (1980): Handbuch für Planung, Gestaltung und Schutz der Umwelt. Bd. 3: Die Bewertung und Planung der Umwelt. BLV Verlagsgesellschaft München, 754 S.

BUND & MISEREOR (1996): Zukunftsfähiges Deutschland. Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt und Energie. Birkhäuser Verlag Basel, 453 S.

BURROUGH, P.A., MACMILLAN, R.A. & W. VAN DEURSEN (1992): Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. Journal of Soil Science 43, S. 193-210.

CAROL, H. (1957): Grundsätzliches zum Landschaftsbegriff. Petermann´s Geogr. Mitt. 101, S. 93-97.

CLARK, C.W. (1976): The Economics of Overexploitation. Science Vol. 181, S. 630-634.

CLAWSON, M. & J.L. KNETSCH (1966): Economics of Outdoor Recreation. John Hopkins Press Baltimore, Maryland, 328 S.

DALY, H.E. (1990): Toward some opreational principles of sustainable development. Ecological Economics 2, S. 1-6.

DANIELS, C. VON & W. LÜTTICH (1982): Geowissenschaftliche Karten des Naturraumpotentials als Unterlagen für Raumordnung und Landesplanung. Verlag Graz, x S..

DAVIDSON, D.A., THEOCHAROPOULOS, S.P. & R.J. BLOKSMA (1994): A land evaluation project in Greece using GIS and based on Boolean and fuzzy set methodologies. International Journal of Geographical Information Systems 8, S. 369-384.

DAVIS, T.J. & C.P. KELLER (1997): Modelling uncertainty in natural resource analysis using fuzzy sets and Monte Carlo simulation: slope prediction. International Journal of Geographic Information Systems 11, S. 409-438.

DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG) (1996): Forschungsfreiheit - ein Plädoyer der DFG für bessere Rahmenbedingungen der Forschung in Deutschland. Deutsche Forschungsgemeinschaft Weinheim, Basel, Cambridge, New York, Tokyo, 156 S.

DE GROOT, R. S. (1992): Functions of Nature. Wolters-Noordhoff Groningen, 315 S.

DREPPER, F.R. & B.Å. MÅNSSON (1993): Intertemporal Valuation in an Unpredictable Environment. Ecological Economics 7, S. 43 - 67.

DURWEN, K.-J. (1997): Landschaftsökologisches Informations-System und digitaler CD-Atlas Baden-Württemberg: Nutzung für großflächige Schutzkonzepte. In: KRATZ, R. & F. SUHLING (Hrsg.): GIS im Naturschutz: Forschung, Planung, Praxis. Westarp-Wissenschaften Magdeburg, S. 223-233.

EC (European Commission) (1996): Environment and Climate 1994 -1998. Workprogramme. Brüssel, 60 S.

ELLENBERG, H. (1982): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht. Ulmer Stuttgart, 989 S.

ELLENBERG, H., JUN. (1991): Ökologische Veränderungen in Biozönosen durch Stickstoffeintrag. Arten- und Biotopschutzforschung in Deutschland. Ber. ökol. Forsch. 4, S. 75-90.

ENQUETE-KOMMISSION Schutz des Menschen und der Umwelt (Hrsg.) (1994): Die Industriegesellschaft gestalten. Economica Verlag Bonn, 765 S.

EPA (1995): A Framework for Measuring the Economic Benefits of Ground Water. EPA 230-B-95-003, Washington D.C., 62 S.

ESOGBUE, A.O. & M.A. ZIKEHI (1982): Fuzzy sets and water resources planning. In: YAGER, R.R. (Hrsg.): Fuzzy set and possibility theory: Recent developments. Pergamon Press New York, S. 450-465.

FELDMANN ET AL. (1997): Regeneration und nachhaltige Landnutzung - Konzepte für belastete Regionen. Springer Heidelberg, 317 S.

FINKE, L. (1980): Anforderungen aus der Planungspraxis an ein geomorphologisches Kartenwerk. Berliner Geogr. Abh. 31, S. 83-90.

FINKE, L. (1994): Landschaftsökologie. Das Geographische Seminar, Westermann Braunschweig, 2. Auflage, 232 S.

FREEMAN III, A.M. (1994): The Measurement of Environmental and Resource Values. Resources for the Future Washington D.C., 516 S.

FRIEDRICH, G. & J. LACOMBE (Hrsg.) (1992): Ökologische Bewertung von Fließgewässern. Limnologie Aktuell 3, 462 S.

GIESSÜBEL, J. (1993): Erfassung und Bewertung von Fließgewässern durch Luftbildauswertung. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz 37, 77 S.

GOODIN, R.E. (1982): Discounting discounting. J. Public Policy 2, S. 53-71.

GRABAUM, R. (1996a): Verfahren der polyfunktionalen Bewertung von Landschaftselementen einer Landschaftseinheit mit anschließender "Multicriteria Optimization" zur Generierung vielfältiger Landnutzungsoptionen. Diss., Shaker-Verlag Aachen, 90 S.

GRABAUM, R. (1996b): Polyfunktionale Bewertung von Landschaftselementen mit anschließender zielorientierter Optimierung. Beiträge zur Regionalen Geographie 42, S. 106-116.

GRABAUM, R. & B.C. MEYER (1997a): Multikriterielle Landschaftsbewertung und Optimierung in Agrarlandschaften. Abstract zum Poster. In: MÜHLE, H. & EICHLER, S. (Hrsg.): TERN-Tagung - Terrestrische und ökosystemare Forschung in Deutschland - Stand und Ausblick. UFZ-Bericht 5/97, S. 106-109.

GRABAUM, R. & B.C. MEYER (1997b): Landschaftsökologische Bewertungen und multikriterielle Optimierung mit Geographischen Informationssystemen (GIS). PFG 2/97, S. 117-130.

GRAMLICH, E. (1991): A Guide to Benefit-Cost-Analysis. Prentice-Hall, 246 S.

GRAUEL, A. (1995): Fuzzy-Logik, BI-Wiss.-Verl. Mannheim, 245 S.

GÜNDRA, H., JÄGER, S., SCHROEDER, M. & R. DIKAU (1995): Bodenerosionsatlas Baden-Württemberg. Agrarforschung in Baden-Württemberg, Bd. 24, Stuttgart, 76 S.

HAASE, G. (1968): Inhalt und Methodik einer umfassenden landwirtschaftlichen Standortkartierung auf der Grundlage landschaftsökologischer Erkundung. Wiss. Veröff. Dt. Inst. F. Länderkunde, N. F. 25/26, S. 309-349.

HAASE, G. (1978): Zur Ableitung und Kennzeichnung von Naturpotentialen. Petermann´s Geogr. Mitt. 122, S. 113-125.

HAASE, G. ET AL. (1991): Naturraumerkundung und Landnutzung - Geochorologische Verfahren zur Analyse, Kartierung und Bewertung von Naturräumen. Beiträge zur Geographie 34/1, Akademie-Verlag Berlin, 373 S.

HALL, G.B., WANG, F. & M. SUBARYONO (1992): Comparison of Boolean and fuzzy classification methods in land suitability analysis by using geographical information systems. Environment and Planning 24, S. 497-516.

HAMACHER, H., LEBERLING, H. & H.-J. ZIMMERMANN (1978): Sensitive analysis in fuzzy linear programming. Fuzzy sets and Systems 1, S. 269-281.

HAMPICKE, U. (1992): Kosten und Wertschätzung des Arten- und Biotopschutzes. In: JUNKERNHEINRICH, M. & P. KLEMMER: Wirtschaftlichkeit des Umweltschutzes. Zeitschrift für Angewandte Umweltforschung, Sonderheft 3/1992, Analytica Verlag Berlin, S. 47-62.

HANLEY, N. & C.L. SPASH (1995): Cost-Benefit-Analysis and the Environmet. Edward Elgar Publishing Ltd. Aldershot, 278 S.

HASE, E. (1996): Grundlagen, Problemfelder und Konsequenzen von Landschaftsbewertungsverfahren. In: PREU, C. & P. LEINWEBER (Hrsg.) (1996): Landschaftsökologische Raumbewertung: Konzeptionen - Methoden - Anwendungen. Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissen-schaft Bd. 16, S. 23-32.

HEINEKE, H.-J. ET AL. (1986): Automatisierte Aufarbeitung der Daten der Bodenschätzung zur Unterstützung der bodenkundlichen Landesaufnahme und zur Ableitung planungsrelevanter bodenökologischer Kriterien. Kieler Geogr. Schriften 64, S. 19-29.

HENNINGS, V. (Hrsg.) (1994): Methodendokumentation Bodenkunde. Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. Geologisches Jahrbuch Reihe F, Heft 31, Hannover, 242 S.

HERRMANN, R. (1977): Einführung in die Hydrologie. Teubner Stuttgart, 151 S.

HERZ K., KAULFUß, W., KRAMER, M. & K.-H. NOACK (1975): Einführung in die Landschaftsanalyse. Lehrmaterial zur Ausbildung von Diplomlehrern für Geographie, Berlin, 122 S.

HERZOG, F., HORSCH, H. & U. STEINHARDT (1997): Quantifying the impact of agroforestry on the landscape water balance. In: L'Agroforesterie pour un Developpment Rural Durable. Agroforestry for Sustainable Land-use. Tagungsband, Montpellier, S. 143-147.

HOEKSTRA, A.Y. (1996): Water policy and sustainable development: An integrated approach. In: FISCHER, W., KARGER, C. & F. WENDLAND: Wasser: Nachhaltige Gewinnung und Verwendung eines lebenswichtigen Rohstoffs. Konferenzen des Forschungszentrums Jülich Bd. 16/96, Jülich, S. 231-255.

HRABOWSKI, K. (1978): Die ökonomische Bewertung des naturräumlichen Bebauungspotentials. In: Beiträge zur planmäßigen Gestaltung der Landschaft. Wiss. Abh. Geogr. Ges. der DDR 14, S. 165-173.

HÜBLER, K.H. & G. SCHABLITZKI (1992): Kosten der Bodenbelastungen in den alten Bundesländern : In: JUNKERNHEINRICH, M. & P. KLEMMER: Wirtschaftlichkeit des Umweltschutzes. Zeitschrift für Angewandte Umweltforschung, Sonderheft 3/1992, Analytica Verlag Berlin, S. 63-72.

HYPERLOGIC CORPORATION (1993): CubiCalc - Manual. Escondido, USA, 195 S.

JACCARD, C. (1990): Fuzzy factorial analysis of snow avalanches. Natural Hazards 3, S. 329-340.

JACOBEIT, J. (1996): Bewertungsverfahren in der Stadtklimatologie. Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft 16, S. 33-42.

JEDICKE, E. (1991): Biotopverbund. Grundlagen und Maßnahmen einer neuen Naturschutzstrategie. 2. Auflage, Ulmer Stuttgart, 287 S.

JOHNSTON, C.A. (1993): Introduction to quantitative methods and modeling in community, population and landscape ecology. In: GOODCHILD, M.F., PARKS, B.O. & L.T. STEYAERT: Environmental modeling with GIS. Oxford University Press New York, S. 276-283.

JOHNSTON, D.M. & L.D. HOPKINS (1987): Expert systems in planning: The logic of uncertainty. Town Planning Review 58, S. 342-346.

JOUBERT, R.A., LEIMAN, A., DE KLERK, H.M., KATUA, S. & J.C. AGGENBACH (1997): Fynbos (fine bush) vegetation and the supply of water: a comparison of multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis. Ecological Economics 22, S. 123-140.

KACPRZYK, J. & M. FREDRIZZI (Hrsg.) (1992): Fuzzy regression analysis. Physica Heidelberg, 279 S.

KAHLERT, J. & H. FRANK (1993): Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control. Vieweg Braunschweig, Wiesbaden, 339 S.

KENT, J.T. & K.V. MARDIA (1988): Spatial classification using fuzzy membership models. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 10, S. 659-671.

KIAS, U. & H. TRACHSLER (1985): Methodische Ansätze ökologischer Planung. Schriftenreihe zur ORL 34, S. 53-77.

KIEMSTEDT, H. (1979): Methodischer Stand und Durchsetzungsprobleme ökologischer Planung. FuS 131, S. 46-62.

KLAPPER, H. (1992): Eutrophierung und Gewässerschutz. G. Fischer Verlag Jena, Stuttgart, 277 S.

KLEMMER, M. (1992): Nutzen des Umweltschutzes - ausgewählte Ergebnisse und methodische Zwischenbilanz eines Forschungsprogrammes. In: JUNKERNHEINRICH, M. & P. KLEMMER (1992): Wirtschaftlichkeit des Umweltschutzes. Zeitschrift für Angewandte Umweltforschung, Sonderheft 3/1992, Analytica Berlin, S. 21- 34.

KLEYER, M. ET AL. (1992): Landschaftsbezogene Ökosystemforschung für die Umwelt- und Landschaftsplanung. Z. Ökologie u. Landschaftsplanung 1, S. 35-50.

KLINK, H. (1990): Ergebnisse siedlungsökologischer Untersuchungen im Ruhrgebiet. Bund Deutscher Landschaftsarchitekten 64, 2, S. 299-344.

KLUG, H. & R. LANG (1983): Einführung in die Geosystemlehre. Die Geographie. Einführungen in Gegenstand, Methode und Ergebnisse ihrer Teilgebiete und Nachbarwissenschaften. Wissensch. Buchgesellschaft Darmstadt, 187 S.

KNOCH, K. (1963): Die Landesklimaaufnahme, Wesen und Methodik. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 85, Bd. 12, Offenbach, 64 S.

KOLLIAS, V.J. & A. VOLIOTIS (1991): Fuzzy reasoning in the development of geographical information systems. FRIS: a prototype soil information system with fuzzy retrieval capabilities. International Journal of Geographical Information Systems 5, S. 209-223.

KOPP, D. (1975): Kartierung von Naturraumtypen auf der Grundlage der forstlichen Standortserkundung. Petermann´s Geogr. Mitt. 119, 2, S. 96-114.

KOSKO, B. (1993): Fuzzy Thinking. The New Science of Fuzzy Logic. Hyperion Verlag New York, 318 S.

KÖTHE, R. & F. LEHMEIER (1993): SARA - Ein Programmsystem zur Automatischen Relief-Analyse. Z. f. Angewandte Geographie 4, 93, S. 11-21.

KRATZ, R. & F. SUHLING (Hrsg.) (1997): GIS im Naturschutz: Forschung, Planung, Praxis. Westarp-Wissenschaften Magdeburg, 236 S.

KRÖNERT, R. (1996): Ökologische Folgen der Landnutzung in Agrarlandschaften des Ballungsgebietes Leipzig-Halle-Bitterfeld.- In: Abschlußbericht Forschungsverbundprojekt REGNAL BMBF-Förderkennzeichen 0339419K, UFZ Leipzig, S.21-89.

KRUTILLA, J.V. (1967): Conservation reconsidered. American Economic Review 57 (4), September 1967, S. 777-786.

KRUTILLA, J.V. & A.C. FISHER (1975): The economics of natural environments: Studies in the valuation of commodity and amenity resources. Johns Hopkins Press. Baltimore, 300 S.

KUGLER, H. (1977): Die geomorphologische Reliefcharakteristik im Atlas DDR. Geogr. Ber. 22, 84, S. 187-197.

KUNZMANN, G. (1989): Der ökologische Feuchtegrad als Kriterium zur Beurteilung von Grünlandstandorten, ein Vergleich bodenkundlicher und vegetationskundlicher Standortmerkmale. Diss., Bot. 134, 254 S.

KVR (KOMMUNALVERBAND RUHRGEBIET, Hrsg.) (1990): Datenanalyse Emscher-Stadtökologie. Bestandsaufnahme und Defizitanalyse ökologischer Daten im Planungsbereich der IBA. Essen

LA TORGAU-OSCHATZ (1995): Konzeption zur Entwicklung des Landkreises Torgau-Oschatz. Torgau, 45 S.

LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) (1981): Grundzüge der Nutzen-Kosten-Untersuchungen. Bremen, 39 S.

LESER, H. (1991a): Landschaftsökologie. UTB 521, Stuttgart, 647 S.

LESER, H. (1991b): Ökologie wozu? Der graue Regenbogen oder Ökologie ohne Natur. Springer Berlin, Heidelberg, 362 S.

LESER, H. & R.-G. SCHMIDT (1981): Die Naherholungsgebiete im Schweizerischen Umland der Stadt Basel: Bestandsaufnahme der Typen und Möglichkeiten für die Planung. Materialien zur Physiogeographie 2, Basel, 36 S.

LEUNG, Y. (1988): Spatial Analysis and Planning under Imprecision. Studies in Regional Sciences and Urban Economics Vol. 17, North-Holland-Amsterdam, New York, Oxford, Tokyo, 374 S.

LEUNG, Y. & K.S. LEUNG (1993): An intelligent expert system shell for knowlegde-based Geographical Informtion Systems: 2. Some applications. International Journal of Geographical Information Systems 7, S. 201-213.

LIEBEROTH, I. (1980): Auswertung der MMK für die Planung der industriemäßigen Pflanzenproduktion. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkunde, Berlin 1980/11, S. 687-694.

LOWELL, K. & C. GOLD (1995): Using a Fuzzy Surface-based Cartographic Representation to Decrease Digitizing Efforts for Natural Phenomena. Cartography and Geographic Information Systems 22, S. 222-231.

MANDL, P. (1992): Applikationsforschung für Geographische Informationssysteme. Konzepte als Schnittstellen zwischen Theorie, Praxis und Methodik. In: Festschrift für Bruno Beck. Klagenfurter Geographische Schriften 10, S.147-158.

MANDL, P. (1993): GIS-Modellbildung und integrierte Geographische Datenverarbeitung als Hauptarbeits-gebiet der GIS-Applikationsforschung in den 90'er Jahren. Salzburger Geographische Materialien 20, S. 7-20.

MANDL, P. (1994): Räumliche Entscheidungsunterstützung mit GIS: Nutzwertanalyse und Fuzzy-Entscheidungsmodellierung. Salzburger Geographische Materialien 21, S. 463-473.

MANDL, P. (1995): Moddelling Decision Processes - A New Applicaation Field for the Fuzzy-Systems-Approach. Klagenfurter Geographische Schriften 13, S. 87-94.

MANDL, P. (1997): Fuzzy-System-Umgebungen als regelgesteuerte Simulationsmaschinen für Geographische Informationssysteme. Internet: Beiträge zum Informatik '96-Workshop am 23.09.1996 in Klagenfurt, http://www.uni-klu.ac.at/groups/geo /gismosim/paper/mandl/mandl.htm.

MANDER, U. ET AL. (1988): Network of compensative areas as an ecological infrastructure of territories. In: SCHREIBER, K.F. (Hrsg): Connectivity in landscape ecology. Münstersche Geogr. Arbeiten 29, S. 35-38.

MANNSFELD, K. (1978): Zur Kennzeichnung von Gebietseinheiten nach ihren Potentialeigenschaften. Peterm. Geogr. Mitt. 122, S. 17-27.

MANNSFELD, K. (1983): Landschaftsanalyse und Ableitung von Naturraumpotentialen. Abh. d. Sächs. Akad. d. Wiss. zu Leipzig, Math.-naturwiss. Kl. 55, 3, 109 S. und Kartenband.

MANNSFELD, K. & H. RICHTER (1995): Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde 238, Trier, 228 S.

MARKS, R. (1979): Ökologische Landschaftsanalyse und Landschaftsbewertung als Aufgabe der Angewandten Physischen Geographie. Bochumer Geogr. Arb., Materialien zur Raumordnung 21, 133 S.

MARKS, R. ET AL. (1992): Anleitung zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushaltes (BA LVL). Forschungen zur deutschen Landeskunde 229, Trier, 222 S.

MAYER, A., MELCHER, B., SCHLINDWEIN, A. & R. WOLKE (1993): Fuzzy Logic: Einführung und Leitfaden zur praktischen Nutzung. Addison-Wesley Bonn, Paris, 289 S.

MCNEILL, D. & P. FREIBERGER (1996): Fuzzy-Logic - Die „unscharfe" Logik erobert die Technik. Droemersche Verlagsanst. Th. Knaur Nachf. München, 447 S.

MEIß, K.M. (1996): Ein Simulationsmodell zur Beurteilung der ökonomisch-ökologischen Umweltverträglichkeit landwirtschaftlicher Betriebe. Diss., Shaker Verlag Aachen, 185 S.

MERTENS, H. (1964): Über die Verwertbarkeit der Bodenschätzungsergebnisse für die bodenkundliche Kartierung. Forsch. und Beratung 10, S. 21-34.

MEYER, B.C. (1996): Regionalisierte Grundlagen für Maßnahmen des Umwelt- und Ressourcenschutzes im Ballungsraum Halle-Leipzig-Bitterfeld. Projektbericht für das UFZ Leipzig, 43 S. (unveröff.).

MEYER, B.C. (1997): Landschaftsstrukturen und Regulationsfunktionen in Intensivagrarlandschaften im Raum Leipzig-Halle. Regionalisierte Umweltqualitätsziele - GIS-Bewertungen - multikriterielle Landschaftsoptimierung. Diss., UFZ-Bericht 24/97, 223 S.

MEYER, B. & R. GRABAUM (1996): Szenarien zur Einschätzung der Bodenerosionsgefährdung durch Wasser mit GIS (ARC/INFO) am Beispiel des Untersuchungsgebietes Jesewitz/Sachsen. Geoökodynamik 17, 1, S. 45-67.

MEYER, B.C. & R. GRABAUM (1997): Multifunktionale Bewertung und Optimierung am Beispiel des Untersuchungsraumes Jesewitz. In: FELDMANN ET AL. (Hrsg.): Regeneration und nachhaltige Landnut-zung - Konzepte für belastete Regionen. Springer Heidelberg, S. 236-243

MEYER, R. (1996): Problemfelder und Perspektiven des Grundwasserschutzes. In: FISCHER, W., KARGER, C. & F. WENDLAND: Wasser: Nachhaltige Gewinnung und Verwendung eines lebenswichtigen Rohstoffs. Konferenzen des Forschungszentrums Jülich Bd. 16/1996, Jülich, S. 61-86.

MEYER, R., JÖRISSEN, J. & M. SOCHER (1995): Technikfolgenabschätzung „Grundwasserschutz und Wasserversorgung". Bd. 1 (557 S.) und 2 (377 S.), Erich Schmidt Verlag Berlin.

MOEVIUS, R. & B. MURSCHEL (1997): Methoden zur Regionalisierung von Standorteigenschaften. - In: KRATZ, R. & F. SUHLING (Hrsg.): GIS im Naturschutz: Forschung, Planung, Praxis. Westarp-Wissenschaften Magdeburg, S. 155-164.

MOSIMANN, T. (1985): Untersuchungen zur Funktion subarktischer und alpiner Geoökosysteme, Finnmark (Norwegen) und Schweizer Alpen. Physiogeographica, Basler Beitr. z. Physiogeographie 7, 490 S.

MÜLLER, E. (1984): Zur Bestimmung von Aspekten des Wasserpotentials aus Ergebnissen der topischen und chorischen Naturraumerkundung. Diss. A, Leipzig, 109 S, Anlagen.

MUNASINGHE, M. & J. MCNEELY (1995): Key Concepts and Terminology of Sustainable Development. In: MUNASINGHE, M. & W. SHEARER (Hrsg.): Defining and Measuring Sustainability. United Nations University and World Bank, Washington D.C., S. 19-56.

NAUK, D., F. KLAWONN & R. KRUSE (1994): Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme. Vieweg Braunschweig, 407 S.

NEEF, E. (1966): Zur Frage des gebietswirtschaftlichen Potentials. Forschungen und Fortschritte 40 (1966), S. 65-70.

NEEF, E. (1967a): Die theoretischen Grundlagen der Landschaftslehre. Haack Gotha, 152 S.

NEEF, E. (1967b): Entwicklung und Stand der landschaftsökologischen Forschung in der DDR. Wiss. Abh. Geogr. Ges. DDR 5, S. 22-34.

NEEF, E. (1969): Der Stoffwechsel zwischen Gesellschaft und Natur als geographisches Problem. Geographische Rundschau 21, S. 453-459.

NEEF, E., SCHMIDT, G. & M. LAUCKNER (1961): Landschaftsökologische Untersuchungen an verschiedenen Physiotopen in Nordwestsachsen. Abh. Sächs. Akademie Wiss. zu Leipzig Math.-Nat. Kl. 47, 1, 112 S.

NEGOITA, C.V. & M. SULARIA (1976): On fuzzy mathematical programming and tolerances in planning. Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research, S. 3-15.

NIEMANN, E. (1982): Methodik zur Bestimmung der Eignung, Leistung und Belastbarkeit von Landschaftselementen und Landschaftseinheiten. IGG Leipzig, Wiss. Mitt. Sonderheft 2, 84 S.

OECD (1991): The state of the environment. Paris, 369 S.

O'HARA, S. (1984): Externe Effekte der Stickstoffdüngung. Diss., Kieler Wissenschaftsverlag VAUK Kiel, 235 S.

ONISHI, S. & M. KAWAGUCHI (1995): On clustering algorithm using a sort of distance between fuzzy data. Tensor, New ser. 56 (1), S. 68-74.

PAFFEN, K.-H. (1953): Die natürliche Landschaft und ihre räumliche Gliederung. Eine methodische Untersuchung am Beispiel der Mittel- und Niederrheinlande. Forschungen zur Deutschen Landeskunde Bd. 68, Remagen, 196 S.

PASSARGE, S. (1912): Über die Herausgabe eines physiologisch-morphologischen Atlas. Verh. 18. Dt. Geogr. Tages zu Innsbruck, Berlin, S. 236-247.

PEARCE, D.W., MARKANDYA, A. & E. BERBIER (1989): Blueprint for a Green Economy. Earthscan Publishing London, 192 S.

PEARCE, D. & R.K. TURNER (1990): Economics of Natural Resources and Environmet. Harvester Wheatsheat New York, 378 S.

PEIßKER, G. (1992a): Fuzzy sets. 2. Lehrbrief. Herausgegeben von der Zentralstelle für das Hochschulfernstudium Dresden, 54 S.

PEIßKER, G. (1992b): Fuzzy sets. 4. Lehrbrief. Herausgegeben von der Zentralstelle für das Hochschulfernstudium Dresden, 51 S.

PETERS, H.-J. (1996): Die Einführung einer Umweltleitplanung durch das Umweltgesetzbuch. Unveröff. Manuskript, 7 S.

PIERI, C., DUMANSKI, J., HAMBLIN, A. & A. YOUNG (1995): Land Quality Indicators. The World Bank Washington D.C., 63 S.

PONSARD, C. & P. TRANQUI (1985): Fuzzy economic regions in Europe. Environment and Planning 17, S. 873-888.

PRICE, C. (1993): Time, Discounting and Value. Blackwell Oxford UK & Cambridge USA, 393 S.

REINBERG, S. & J. BRÖTHALER (1997): Integration von Fuzzy-Methoden in Bewertungsverfahren. In: SCHRENK, M. (Hrsg.): Computergestützte Raumplanung - Beiträge zum Symposium CORP 1997. TU Wien, S. 51-63.

REINKE, E. (1993): Verfahrensansatz zur Berücksichtigung zoologischer Informationen bei der UVP. Naturschutz und Landschaftsplanung 25, 1, S. 5-10.

RENGER, M. & O. STREBEL (1980): Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften. Wasser und Boden 32, S. 362-366.

RENNINGS, K. & H. WIGGERING (1997): Steps towards indicators of sustainable development: Linking economic and ecological concepts. Ecological Economics 20, S. 25-36.

RICHTER, O. ET AL. (1997): Koppelung Geographischer Informationssysteme (GIS) mit ökologischen Modellen im Naturschutzmanagement. In: KRATZ, R. & F. SUHLING (Hrsg.): GIS im Naturschutz: Forschung, Planung, Praxis. Westarp-Wissenschaften Magdeburg, S. 5-29

RIECKEN, U., RIES, U. & A. SSYMANK (1994): Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen der Bundesrepublik Deutschland. Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz, Heft 41, Bonn-Bad Godesberg, 184 S.

ROBINSON, V.B. (1988): Some implications of fuzzy set theory applied to geographic databases. Computers, Environment and Urban Systems 12, S. 89-97.

ROMMELFANGER, H. (1988): Entscheiden bei Unschärfe: Fuzzy-decision-support-Systeme. Springer Berlin, 304 S.

ROWECK, H. (1995): Landschaftsentwicklung über Leitbilder? LÖBF-Mitt. 4/95, S. 25-34.

ROTHKEGEL, W. (1950): Geschichtliche Entwicklung der Bodenbonitierung und Wesen und Bedeutung der deutschen Bodenschätzung. Ulmer Stuttgart, 147 S.

RSU (RAT DER SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN) (1994): Umweltgutachten 1994. Metzler-Poeschel Stuttgart, 380 S.

SÄCHSISCHE STAATSKANZLEI (1993): Sächsisches Wassergesetz (SächsWG) vom 23. Februar 1993. In: Sächsisches Gesetz- und Verordnungsblatt Nr. 13 vom 12. März 1993, S. 201-228.

SÄCHSISCHE STAATSKANZLEI (1994): Verordnung des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung über Schutzbestimmungen und Ausgleichsleistungen für erhöhte Aufwendungen der Land- und Forstwirtschaft in Wasserschutzgebieten vom 30. Juni 1994. In: Sächsisches Gesetz- und Verordnungsblatt Nr. 39 vom 14. Juli 1994, S. 1178-1199.

SAW (Sächsische Akademie der Wissenschaften, AG Naturhaushalt und Gebietscharakter) (1997): Naturräumliche Einheiten Sachsens im mittleren Maßstab. Erfassung, Dokumentation, Anwendung. Freistaat Sachsen, Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung Dresden, 62 S.

SCHLÜTER, H. (1985): Kartographische Darstellung und Interpretation des Natürlichkeitsgrades der Vegetation in verschiedenen Maßstabsbereichen. Wiss. Abh. d. Geogr. Ges. d. DDR 18, S. 105-116

SCHLÜTER, H. (1991): Ökologische Gliederung und Bewertung des Bezirkes Leipzig nach Vegetationsmerkmalen. - In: NEUMEISTER, H. (Hrsg.): Ausgewählte geoökologische Entwicklungsbedingungen Nordwestsachsens. IGG Leipzig, S. 51-68.

SCHMIDT, D. (1995a): Kopplung des Raster-GIS IDRISI mit einem Fuzzy-Klassifikationsmodell zur Modellierung eines unscharfen räumlichen Entscheidungsprozesses. Diplomarbeit, Institut für Geographie der Universität Bonn, 132 S.

SCHMIDT, D. (1995b): Coupling Fuzzy Logic and Geographical Information for Spatial Classification Purposes. In: Third European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing EUFIT'95. Vol. III, Aachen, S. 1407-1414. (Internet: http://zidsrv.sci.uniklu.ac.at/~dschmidt/texte/eufitwww.htm)

SCHMIDT, D. (1996): Kopplung des Raster-GIS IDRISI mit einem Fuzzy-Klassifikationsmodell zur Modellierung eines unscharfen räumlichen Entscheidungsprozesses Zur Erstellung einer Thermotopkarte auf Grundlage von Thermal und Flächennutzungsdaten. In: LORUP, E. & J. STROBL (Hrsg.): IDRISI GIS 96. Salzburger Geographische Materialien 25, S. 245-254. (im Internet mit Programmdateien verfügbar unter: http://www.edvz.sbg.ac.at/geo/idrisi/idrgis96/schmidt/CDTEXT.htm)

SCHMIDT, R. & R. DIEMANN (Hrsg.) (1981): Erläuterungen zur Mittelmäßigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK). Akad. der Landwirtschaftswissenschaften der DDR Eberswalde, 78 S.

SCHMITHÜSEN, J. (1964): Was ist eine Landschaft? Steiner Verlag Wiesbaden, 24 S.

SCHMITHÜSEN, J. (1968): Allgemeine Vegetationsgeographie. 3. erw. Aufl., De Gruyter Berlin, 463 S.

SCHÖNBORN, W. (1992): Fließgewässerbiologie. G. Fischer Verlag Jena, Stuttgart, 504 S.

SCHWANECKE, W. (1983): Zur Rolle der Waldvegetation bei der Kennzeichnung von Naturraumeinheiten auf der Grundlage der forstlichen Standortserkundung im Mittelgebierge/Hügelland der DDR. Petermann´s Geogr. Mitt. 127, 4, S. 245-254.

SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & M. KAINZ (1990): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer Stuttgart, 64 S.

SENSTADTUM (SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELTSCHUTZ, Hrsg.) (1990): Ökologisches Planungsinstrument Naturhaushalt/Umwelt. Berlin, 183 S.

STOCK, P. & W. BECKRÖGE (1985): Klimaanalyse Stadt Essen. Planungshefte Ruhrgebiet 15, Kommunalverband Ruhrgebiet (Hrsg.), Essen, 123 S.

STOCK, P. (1992): Synthetische Klimafunktionskarte Ruhrgebiet. Kommunalverband Ruhrgebiet (Hrsg.), Essen, 68 S.

STROBL, J. (1988): Reliefanalyse mit dem Computer. Anwendungsmöglichkeiten digitaler Geländemodelle in der Physischen Geographie. Geogr. Rundschau 40, 5, S. 38-43.

SPORBECK, O. (1979): Bergbaubedingte Veränderungen des physischen Nutzungspotentials. Bochumer Geogr. Arb. 37, 189 S.

SUCCOW, M. (1991): Seen als chorische Naturraumeinheiten. Beiträge zur Geographie 34, S. 100-114.

SUI, D.Z., (1992): A fuzzy GIS modelling approach for urban land evaluation. Computers, Environment and Urban Systems 16, S. 101-115.

SUTER, M. ET AL. (1996): Vistuelle Simulation realer Landschaften als Basis für ein virtuelles GIS. Salzburger Geographische Materialien 24, S 218-232.

SYRBE, R.-U. (1993): Landschaftsbewertung im Oberspreewald auf geoökologischer Grundlage - eine methodische Studie. Diss., Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie Potsdam, 196 S.

SYRBE, R.-U. (1995): Methodik der Landschaftsbewertung auf geoökologischer Grundlage. Arch. f. Nat. Landsch. 33, S. 287-316.

SYRBE, R.-U. (1996a): Fuzzy-Bewertungsmethoden für Landschaftsökologie und Landschaftsplanung. Arch. f. Nat. Landsch. 34, S. 181-206.

SYRBE, R.-U. (1996b): Das Informationssystem der Naturräume und Naturraumpotentiale des Freistaates Sachsen. In: DOLLINGER, F. & J. STROBL (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbei-

tung VIII. Beiträge zum GIS-Symposium 3. - 5. Juli 1996. Salzburger Geographische Materialien 24, S. 138-143.

TERANO, T., ASAI, K. & M. SUGENO (1987): Fajii shisutemu nyuumon. Ohm Company, Tokyo, 268 S.

THOMAS-LAUCKNER, M. & G. HAASE (1967): Versuch einer Klassifikation von Bodenfeuchteregime-Typen. Albrecht-Thaer-Archiv 11, S. 1003-1020.

TIETJE, O. & M. TAPKENHINRICHS (1993): Evaluation of Pedo-Transfer-Functions. Soil Sci. Soc. Am. J. 57, S. 1088-1095.

TILLI, T. (1991): Fuzzy-Logik, Grundlagen, Anwendungen, Hard- und Software. Franzis Verlag München, 256 S.

TILLI, T. (1993): Fuzzy-Shell für Windows : Version 1.2. Franzis Verlag München, 152 S.

TRAUTNER, J. (Hrsg.) (1992): Methodische Standards zur Erfassung von Tierartengruppen. Margraf Verlag Weikersheim, 254 S.

TREGER, D. (1994): Einführung in die Fuzzy-Logik. Teubner Stuttgart, 176 S.

TROLL, C. (1950): Die geographische Landschaft und ihre Erforschung. Studium Generale 3, S. 163-181.

UHLIG, H. (1954): Beispiel einer kleinklimatologischen Geländeuntersuchung. Zeitschr. Meteorologie 8, S. 66-75.

VOLK, M. & U. STEINHARDT (1996): Erstellung und Anwendung digitaler Geländemodelle mit ERDAS Imagine und ARC/INFO. In: GEOSYSTEMS (Hrsg.): GUGM´96 - GEOSYSTEMS User Group Meeting 1996, 8.-10. Oktober. Tagungsband, Germering, ohne Seitenangaben.

WANG, F.-J. (1994): Towards a natural language user interface: an approach of fuzzy query. International Journal of Geographical Information Systems 8, S. 143-162.

WEDDE, D. (1983): Zur Kennzeichnung des räumlich differenzierten Entsorgungspotentials im glazial bestimmten Tiefland der DDR. Wiss. Z. d. Päd. Hochschule Potsdam 27, 3, S 531-542.

WERTH, W. (1987): Ökomorphologische Gewässerbewertung in Oberösterreich (Gewässerzustandkartierung). Österr. Wasserwirtschaft 39, S. 122-128.

WOLF, W. (1996): Der Einsatz eines Fuzzy-Set-Modells für eine gebietliche Bewertung am Beispiel der „potentielen Baueignung". Geo-Informations-Systeme 6, S. 19-26.

XIANG, W.N., GROSS, M., FABOS, J.G. & E.B. MACDOUGALL (1992): A fuzzy-group multicriteria decisionmaking model and its application to land-use planning. Environment and Planning B: Planning and Design 19, S. 61-84.

YAN, W., SHIMIZU, E. & H. NAKAMURA (1991): A Knowledge-based Computer System for Zoning. Computers, Environment and Urban Systems 15, S. 125-140.

ZADEH, L.A. (1965): Fuzzy Sets. Information and Control 8, S. 338-353.

ZADEH, L.A. (1978): Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of possibility. Fuzzy Sets and Systems 1, S. 3-28.

ZADEH, L.A. (1996): Fuzzy Logic = Computing with Words. IEEE Transactions on Fuzzy Systems Vol. 4, No. 2, S. 103-111.

ZANGEMEISTER, C. (1973): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. 3. Auflage, Wittemann Verlag München, 370 S.

ZIMMERMANN, H.J., ANGSTENBERGER, J., LIEVEN, K. & R. WEBER (1993): Fuzzy-Technologien: Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale. VDI-Verlag Düsseldorf, 251 S.

ZUCCHI, H. (1990): Gedanken zur Erstellung faunistisch-ökologischer Gutachten. Mitt. d. Landesanst. f. Ökologie, Landschaftsentw. u. Forstplanung Nordrhein-Westfalen (LÖLF) 15, 3, S. 13-21.

Anschrift der Autoren:

Dr. Ralf Grabaum
Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle
Projektbereich Naturnahe Landschaften und Ländliche Räume
Postfach 2, 04301 Leipzig

Prof. Helga Horsch
Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle
Abteilung Ökologische Ökonomie und Umweltsoziologie
Postfach 2, 04301 Leipzig

Prof. Rudolf Krönert
Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle
Sektion Angewandte Landschaftsökologie
Postfach 2, 04301 Leipzig

Dr. Bengt Mansson
Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle
Abteilung Ökologische Ökonomie und Umweltsoziologie
Postfach 2, 04301 Leipzig

Dr. Burghard Meyer
Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle
Sektion Angewandte Landschaftsökologie
Postfach 2, 04301 Leipzig

Dr. Eckhard Müller
Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle
Sektion Angewandte Landschaftsökologie
Postfach 2, 04301 Leipzig

Dipl.-Geogr. Dirk Schmidt
GMD - German National Research Center for Information Technology
FIT.KI Research Division Artificial Intelligence
Schloß Birlinghoven, 53754 Sankt Augustin

Dr. Uta Steinhardt
Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle
Sektion Angewandte Landschaftsökologie
Postfach 2, 04301 Leipzig

Dr. Ralf-Uwe Syrbe
Sächsische Akademie der Wissenschaften
Arbeitsgruppe Naturhaushalt und Gebietscharakter
Neustädter Markt 19, 01097 Dresden

Dr. Martin Volk
Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle
Sektion Angewandte Landschaftsökologie
Postfach 2, 04301 Leipzig

Dr. Ralf Wieland
Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF)
Institut fuer Landschaftsmodellierung
Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg

Dr. Wilfried Wolf
Humboldt-Universität Berlin
Geographisches Institut
Chausseestraße 86, 10115 Berlin

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
Projektbereich Naturnahe Landschaften
und Ländliche Räume
Permoserstraße 15
D-04318 Leipzig
Telefon 0341/235-2519
Telefax 0341/235-2534

Sektion Angewandte Landschaftsökologie
Permoserstraße 15
D-04318 Leipzig
Telefon 0341/235-2166
Telefax 0341/235-2511