

Anwendung der Hasse-Diagrammtechnik zur vergleichenden Bewertung von Umweltveränderungen

¹Rainer Brüggemann, ¹Andreas Kaune, ¹Joachim Klein, ²Reinhard Zellner

¹ GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Neuherberg, D-85764 Oberschleißheim

² Universität GH Essen, Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, D-56117 Essen

Korrespondenzautor: Dr. Rainer Brüggemann, Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Abt. Ökohydrologie/Geb. 13.4, Rudower Chaussee 5, D-12489 Berlin

Zusammenfassung

Anhand von vier dynamischen Kriterien werden die folgenden, beobachteten bzw. zu erwartenden Umweltveränderungen, die zum Teil die Qualität von Ökosystemveränderungen haben, vergleichend bewertet: Treibhauseffekt, Ozonzerstörung, Eutrophierung und Versauerung aquatischer Ökosysteme, Photosmog, Bodenverbrauch, Artenverlust, Ressourcenverbrauch, Ertragsverluste, Waldsterben, Lärm und Geruch. Die Priorisierung solcher Umweltveränderungen aufgrund von raum/zeitlichen Kriterien wie (1) räumliche Betroffenheit, (2) zeitliche Änderung, (3) Halbwertszeit der Reversibilität und (4) Ausmaß der Irreversibilität führt zu Widersprüchen bei Verwendung eines einzelnen Rangfolgeindex. Es wird gezeigt, daß die Analyse mit Hilfe der Hasse-Diagrammtechnik zu partiell geordneten Mengen führt, die bei der Herleitung einer Rangfolge des Handlungsbedarfs bei Umweltveränderungen berücksichtigt werden sollten. Als prioritäre Elemente ergeben sich der Artenverlust, der Ressourcenverbrauch und die Ozonzerstörung, also Änderungen von ökosystemarer Qualität. Hinsichtlich der verwendeten vier Kriterien sind diese Ökosystemveränderungen untereinander jedoch nicht vergleichbar und erfordern daher unterschiedliche Handlungsstrategien.

Schlagwörter: Umweltveränderungen; ökologische Schutzziele; vergleichende Bewertung; partiell geordnete Mengen; Hasse-Diagrammtechnik

Abstract

Application of the Hasse-Diagram Technique for a Comparative Evaluation of Environmental Changes

Using four dynamic criteria, the following environmental changes were evaluated: Global warming; destruction of the stratospheric ozone layer; eutrophication and acidification of aquatic ecosystems; photochemical smog; reduction of the available area of agricultural soils; loss of species diversity; consumption of resources; reduction of crop yield; forest decline; noise, and smell. These ecosystem changes, or negative effects, were characterized by four dynamic criteria: 1) Regional importance, 2) extent of alteration, 3) resilience and 4) irreversibility. A multi-criteria assessment, accounting simultaneously for all four criteria, requires a generalized concept of order. Here, the concept of partially ordered sets, visualized by Hasse diagrams, was used to derive a priority list of environmental changes. Highest priority was equally assigned to the loss of species diversity, the consumption of resources and the destruction of the ozone layer. However, these ecosystem changes are incomparable to each other concerning the four criteria used and thus require different management strategies.

Key words: Environmental changes; ecological protection aims; comparative evaluation; partially ordered sets; Hasse-diagram technique

1 Einleitung

Ozonabbau in der Stratosphäre, Gewässerversauerung und -eutrophierung, Bodenerosion und andere Beeinträchtigungen von Schutzgütern können anhand von raum/zeitlichen Kriterien vergleichend bewertet werden. Die hier untersuchten Beeinträchtigungen haben zum Teil die Qualität von Ökosystemveränderungen, zum anderen Teil vermindern sie die Lebensqualität. Durch die Bewertung soll eine Handlungsreihenfolge zur Bewahrung vor negativen Umweltveränderungen oder zur Wiederherstellung von Schutzgütern abgeleitet werden. Die Bewertungskriterien (wie z.B. die Halbwertszeit reversibler Änderungen) quantifizieren die bereits eingetretenen oder die zu erwartenden Umweltveränderungen. Diesen Umweltveränderungen kann aus Sicht unabhängiger, einzelner Betrachter subjektiv prioritäre Bedeutung zugeordnet werden. Es stellt sich daher die Frage, wie sie möglichst objektiv in einer Rangfolge zu ordnen, d.h. zu priorisieren oder zu hierarchisieren sind. An einer solchen Priorisierung, aus der sich ein Handlungsbedarf ableiten läßt, besteht großes gesellschaftspolitisches Interesse [1]. Konventionelle Ansätze wie die Einführung eines Rangfolgeindex, der eine lineare Ordnung erzwingt, berücksichtigen nur unzureichend die unterschiedlichen Qualitäten der Einzelbewertungen. Vielmehr muß ein verallgemeinerter Ordnungsbegriff verwendet werden, der strenge lineare Ordnungen nur als Spezialfall enthält und Halbordnungen, d.h. partiell geordnete Mengen (synonym halbgeordnete Mengen), einführt (Hasse-Diagramme).

2 Auswahl der Objekte und Herleitung von individuellen Bewertungsfaktoren

2.1 Allgemeine Übersicht über die Teilschritte der Bewertung

Die vergleichende Bewertung aus ökosystemarer Sicht ist im Vergleich zu einer Bewertung, in der der Mensch im Mittelpunkt steht, wesentlich komplexer, weil nicht mehr eine Spezies – der Mensch –, sondern viele Spezies mit ihren Interaktionen und ihren Abhängigkeiten von der abiotischen Umgebung zu berücksichtigen sind. Dabei sind ver-

schiedene Organisationsebenen und ihre Wechselwirkungen mit ihren unterschiedlichen Zeit- und Raumskalen in das Bewertungskonzept zu integrieren.

Im allgemeinen kann eine Bewertung nach folgenden Schritten vorgenommen werden:

1. Objektauswahl, z.B. bestimmte Umwelteilsysteme (Grundwasser, Böden, Pflanzen, ...), Chemikalien, Kartiereinheiten, Regionen, Testsysteme.
2. Definition von Kriterien in Abhängigkeit von der Objektauswahl. Hierbei sollte ein wesentliches Element ökosystemarer Betrachtungsweise, nämlich die Interaktion verschiedener Systemebenen, mit erfaßt werden [2].
3. Auswahl des Verfahrens, wie die Objekte hinsichtlich der in 2. gewählten Kriterien ordinal quantifiziert werden können. Diese quantitativen Maße werden Deskriptoren genannt und in der Informationsbasis (IB) der vergleichenden Bewertung zusammengefaßt [3].
4. Vergleich der durch Deskriptoren quantifizierten Objekte mit folgenden Zielen:
 - Identifikation von prioritären Objekten,
 - Aufstellung logisch konsistenter Sequenzen von Objekten nach zunehmender Belastung,
 - Ableitung von Handlungsstrategien.

2.2 Vergleichende Bewertung von Umweltveränderungen

2.2.1 Objektauswahl

Es wurden verschiedene Umweltveränderungen ausgewählt (→ *Tabelle 1*), um möglichst viele verschiedene Qualitäten zu erfassen, und in der Menge P zusammengefaßt. Diese Umweltveränderungen werden im weiteren Text auch als „Objekte“ bezeichnet. Dennoch ist die Aufstellung der *Tabelle 1* keinesfalls vollständig. Insbesondere fehlen wichtige Teilbereiche, die dem Schutzziel „Erhaltung der Gesundheit von Lebewesen“ zuzuordnen sind. Eine vollständige Zusammenstellung von Schutzziele findet sich in [1].

$P = \{\text{Treibhauseffekt, Ozonzerstörung, Eutrophierung, Versauerung, Photosmog, Bodenverbrauch, Artenverlust, Ressourcenverbrauch, Ertragsverluste, Waldsterben, Lärm, Geruch}\}$.

Der Bodenverbrauch beinhaltet den Verlust von Lebensraum und Transformationsfunktionen aufgrund von Versiegelung des Bodens und landwirtschaftlicher Nutzung. Der Ressourcenverbrauch umfaßt den Zugriff auf Bodenschätze.

2.2.2 Wahl der Informationsbasis (IB) zur Bewertung

Der nächste Schritt muß sein, die Informationsbasis zur vergleichenden Bewertung zu erstellen. Für die Bewertung der Objekte wurden die Dynamik und das regionale Ausmaß der Umweltveränderungen durch folgende Kriterien erfaßt:

- gegenwärtige Geschwindigkeit der Veränderung (Z),
- Halbwertszeit der Reversibilität (Zk),
- Irreversibilität (I),
- regionale Betroffenheit (R).

Unter der gegenwärtigen Geschwindigkeit der Veränderung soll die zeitliche Änderung eines Umwelteffektes verstanden werden. Falls dieser sich schnell einem kritischen Grenzzustand nähert, ist ein hoher Handlungsbedarf gegeben und umgekehrt. Unter Halbwertszeit der Reversibilität (Zk) wird die Rückkehrzeit einer Ökosystemveränderung in ihren ursprünglichen Zustand verstanden, sobald die anthropogene Störung durch Eingreifen des Menschen beseitigt ist. Zk ist damit ein Maß für die Nachwirkungszeit im Handlungsfall und damit für die integrale zeitliche Auswirkung. Unter Irreversibilität soll das Ausmaß der Nicht-Rückkehrbarkeit einer Umweltveränderung verstanden werden, die selbst beim Eingreifen des Menschen erhalten bleibt.

Mit Ausnahme der regionalen Betroffenheit beschreiben diese Kriterien zeitliche Charakteristiken. Sie führen zu der Aussage, daß ein hoher Handlungsbedarf immer dann besteht, wenn sich anthropogen induzierte Umweltveränderungen schnell vollziehen und/oder wenn diese nur langsam, aber nicht umkehrbar sind. Damit wird u.a. auch der Persistenz von Stoffen Rechnung getragen, die an der Umweltveränderung beteiligt sind (z.B. CO₂ beim Treibhauseffekt, FCKWs bei der Ozonzerstörung). Das Kriterium der regionalen Betroffenheit wird zusätzlich aufgenommen, um globale Effekte von regionalen und lokalen zu differenzieren. Dies geschieht vornehmlich aus einer anwachsenden Verpflichtung der stärkeren Betonung lokaler/regionaler Quellen mit globalen Auswirkungen.

Die Informationsbasis (IB), mit der die Umweltveränderungen vergleichend bewertet werden sollen, ist also: $IB = \{Z, Zk, I, R\}$.

2.3 Ausprägungsmenge

Für die einzelnen Bewertungskriterien wurde eine fünfgliedrige Bewertungsskala gewählt [1]: sehr hoch/sehr groß (4), hoch/groß (3), mäßig (2), niedrig/klein (1), sehr niedrig/sehr klein (0). Eine solche Skalierung wurde gewählt, um eine ausreichende Differenzierung zu erreichen. Selbstverständlich bleibt die Anwendung dieser Skalierung auf die einzelnen Kriterien subjektiv geprägt. Eine streng begründbare Ausführung dieser Bewertungsskala ist nicht möglich.

Die damit gewonnenen Bewertungszahlen werden D_{ij} genannt, wobei sich der Index i auf das i.te Objekt und der Index j auf das j.te Kriterium der IB bezieht.

3 Bewertung

Die Objekte der Objektmenge P, die Kriterien und die Ausprägungen sind in *Tabelle 1* zusammengestellt. Zusätzlich wurde analog zu [1] ein Rangfolgeindex χ (in [1] Priorisierungsfaktor genannt) eingeführt.

$$\chi_i = \sum_{j=1}^4 D_{ij} g_j \quad (\text{Gl. 3-1})$$

mit $g_j = 1$ für alle j.

Man beachte hierbei die impliziten Annahmen, die hinter der Definition von Rangfolgeindizes stehen: (1) Annahme einer speziellen Funktion, die die Deskriptoren auf χ abbilden, nämlich einer linearen Form, und (2) die Annahmen über die Gewichte g_j .

Tabelle 1: Objekte und ihre Bewertung anhand der vier Kriterien: regionale Betroffenheit (R), gegenwärtige Geschwindigkeit der Veränderung (Z), Halbwertszeit der Reversibilität (Zk) und Irreversibilität (I). In der letzten Spalte ist χ , der Rangfolgeindex, angegeben (kursiv: Identifier in allen nachfolgenden Diagrammen)

	R	Z	Zk	I	χ
treibhauseffekt	4	3	4	2	13
ozonzerstörung	4	4	4	2	14
eutrophierung	1	2	2	1	6
versauerung	1	2	2	0	5
photosmog	1	3	0	0	4
bodenverbrauch	2	2	3	0	7
artenverlust	2	1	4	4	11
ressourcenverbrauch	4	3	4	4	15
ertragsverluste	2	2	2	1	7
waldsterben	3	4	4	2	13
/ärm	0	3	0	0	3
geruch	0	2	0	0	2

Anhand des Rangfolgeindex χ ergibt sich folgende Reihenfolge der Objekte:

$$g < l < p < v < e < b = ev < a < w = t < o < r.$$

Sie zeigt (am rechten Ende der Sequenz), daß ein hoher Handlungsbedarf besteht beim Treibhauseffekt (t), bei der Ozonzerstörung in der Stratosphäre (o), beim Ressourcenverbrauch (r), beim Waldsterben (w) und beim Artenverlust (a). Dies wird begründet durch die hohen Halbwertszeiten der Reversibilität und/oder dem Ausmaß der Irreversibilität. Weniger hoch dagegen ist der Handlungsbedarf bei Lärm und Geruchsbelästigung, aber auch bei der Gewässerversauerung und -eutrophierung sowie dem Photosmog. Die Geringfügigkeit des Handlungsbedarfs in den letzteren Fällen beruht auf der räumlichen Begrenzbarkeit sowie den kurzen Zeitskalen und dem hohen Ausmaß der Reversibilität.

Mit der einfachen Priorisierung von Objekten anhand von χ ist aber die Frage der unterschiedlichen Qualitäten nicht gelöst. So hat z.B. der Treibhauseffekt in bezug auf die räumliche Betroffenheit eine höhere Priorität als der Ressourcenverbrauch. Diese Priorität kehrt sich aber um, wenn man das Ausmaß der Irreversibilität betrachtet. Ähnliches gilt für den Vergleich der anderen Objekte untereinander und ist gerade dann wichtig, wenn χ mittlere bis hohe Werte annimmt. Bei mittleren Werten von χ sind kombinatorisch viele Unterschiede in den Qualitäten möglich. Bei hohen Werten von χ sind qualitative Unterschiede von hoher Relevanz für Handlungsstrategien. Dieses Problem kann nur durch Einführung eines verallgemeinerten Ordnungsbegriffs, wie er z.B. in der Verbandstheorie behandelt wird, gelöst werden (siehe [4]).

4 Hasse-Diagramm

4.1 Einführende Anmerkungen

Grundlagen der nachfolgend dargestellten sog. Hasse-Diagramme sind Ordnungsrelationen auf der Menge von Objekten. Solche Mengen nennt man auch partiell geordnet, um auszudrücken, daß nicht notwendigerweise jedes Objekt mit jedem anderen verglichen werden kann. Partiiell geordnete Mengen kann man oft mit Vorteil graphisch darstellen (Hasse-Diagramme). Die Konstruktion von Hasse-Diagrammen ist an anderer Stelle [4, 6–8] sowie in den vorangegangenen Teilen dieser Artikelserie ausführlich beschrieben.

4.2 Diskussion des Hasse-Diagramms

Das Hasse-Diagramm der Objekte, die durch die Einzelbewertungen in Tabelle 1 charakterisiert sind, ist in Abb. 1 dargestellt. Ein solches Diagramm wird nach folgenden Regeln gelesen:

1. Jedes Objekt ist durch einen Kreis und einen darin eingeschriebenen Identifier dargestellt.
2. Zwischen zwei Objekten befindet sich ein Linienzug, wenn eine \leq -Relation für alle (vier) Komponenten gilt.
3. Das Hasse-Diagramm hat eine Orientierung: Man darf Linien nur von oben nach unten oder nur von unten nach oben lesen. In diesem Sinne sind zwei Objekte durch einen Linienzug miteinander verbunden, wenn jede Linie des Linienzugs mit dem gleichen Orientierungssinn durchlaufen werden kann. Also: r ist mit b, aber r ist nicht mit w verbunden.
4. Zwei Objekte sind benachbart, wenn auf dem Linienzug zwischen den beiden Objekten kein weiteres erreichbar ist. Also: v und b sind benachbart. v und t sind nicht benachbart, denn Objekt b befindet sich zwischen v und t. Die Objekte v und t sind aber miteinander verbunden.

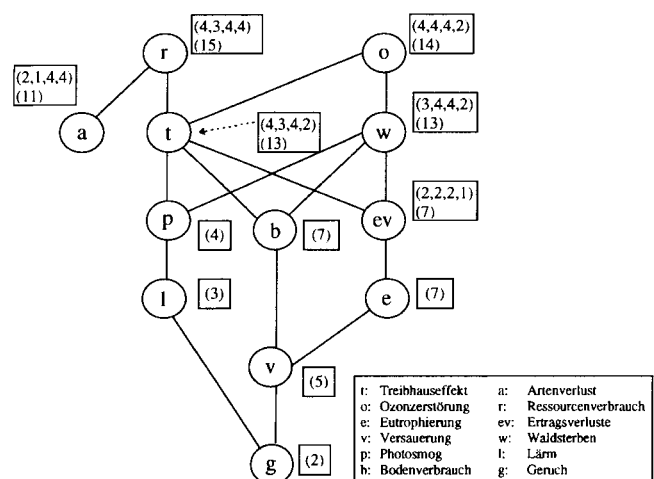


Abb. 1: Hasse-Diagramm der 12 Objekte auf Grundlage der Einzelbewertungen der Tabelle 1. Bei einigen Objekten sind die Einzelbewertungen, bei allen Objekten die Rangfolgeindizes χ angegeben

4.3 Interpretation

4.3.1 Diskussion der Objekte nach ihrer Stellung im Hasse-Diagramm

Die Geringfügigkeit des Handlungsbedarfs im Fall Geruch (g) wird in **Abb. 1** unmittelbar evident, denn Objekt g ist ein sogenanntes minimales Element. Das heißt, es gibt keine weiteren Objekte, die vergleichbar bessere Einzelbewertungen erhalten haben. „Lärm“ und „Versauerung“ sind obere Nachbarn von „Geruch“ im Hasse-Diagramm, sind aber miteinander nicht vergleichbar. Es müssen demnach Kriterien der IB vorkommen, die für Lärm und Versauerung gegensinnige Ausprägungen haben. Mit Ausnahme der Ausprägung für die gegenwärtige Geschwindigkeit der Veränderung (Z) haben alle Ausprägungen von „Lärm“ Werte, die kleiner oder gleich denjenigen von „Versauerung“ sind.

Ressourcenverbrauch und Ozonzerstörung stehen in **Abb. 1** an prominenter Stelle: Sie haben beide keine oberen Nachbarn, d.h., sie sind sog. maximale Elemente. Sie sind in ihren Einzelbewertungen unvergleichbar, woraus wegen ihrer Maximalität nicht nur der hohe Handlungsbedarf als solcher abgeleitet werden kann, sondern auch wegen der Unvergleichbarkeit verschiedene Handlungsziele aufgezeigt sind: Im Ressourcenverbrauch ist die Geschwindigkeit der Veränderung eher gering. Bei der Ozonzerstörung liegt dagegen das Problem nicht in der Irreversibilität, sondern in den drei anderen Kriterien. Gemeinsam ist beiden die hohe Einzelbewertung bezüglich regionaler Betroffenheit und der Halbwertszeit der Reversibilität.

Die relativ singuläre Beurteilung des Artenverlusts kommt durch die Stellung im Hasse-Diagramm zum Ausdruck. Man erkennt, daß der Artenverlust Einzelbewertungen so aufweist, daß es nur einen (oberen) Nachbarn (Ressourcenverbrauch) gibt. Die Einzelbewertungen für den Treibhauseffekt weisen diesen als nachgeordnet sowohl zum Ressourcenverbrauch als auch zur Ozonzerstörung aus. Dies ist im Hasse-Diagramm anhand der zwei Linien erkennbar, die von t nach r und von t nach o ausgehen. Der Waldschaden (im Hasse-Diagramm w) ist in seinen Einzelbewertungen nur der Ozonzerstörung nachgeordnet.

Diese Analyse gibt Anlaß, die Reihenfolge des Handlungsbedarfs aus der Lage der Objekte (hier also Artenverlust (a), Ressourcenverbrauch (r), Ozonzerstörung (o), usw.) im Hasse-Diagramm wie folgt abzuleiten: Die höchste Priorität haben die maximalen Elemente (r und o). Wegen der Unvergleichbarkeit dieser beiden Objekte kann die wissenschaftliche Analyse keine weitere Rangfolge ableiten. Die nächsthöhere Priorität kommt denjenigen Objekten zu, deren obere Nachbarn maximale Elemente sind.

Man sieht außerdem, daß bei gleichem Rangfolgeindex χ unterschiedliche Belastungen auftreten, wie bereits in Kap. 3 für den Treibhauseffekt diskutiert. Aber auch unterschiedliche Rangfolgenindizes, wie für Ozonverbrauch ($\chi = 14$) und Artenverlust ($\chi = 11$), maskieren, daß der Artenverlust durchaus Aufmerksamkeit erfordert, weil die Ausprägungen für den Artenverlust zwar bei drei von vier

Elementen der IB kleiner oder gleich denjenigen des Ozonverbrauchs sind, aber der Artenverlust beim Kriterium Irreversibilität einen höheren Wert aufweist.

4.3.2 Logisch widerspruchsfreie Sequenzen

Ordnet man die Objekte nach ihrer Einzelbewertung, so erhält man vier Sequenzen, die aber bestimmte Objekte in verschiedenen Reihenfolgen aufweisen. Beispielsweise erhält man für die ersten zwei Elemente der IB die folgenden zwei Sequenzen:

$$\begin{aligned} R: g &= l < p = v = e < ev = a = b < w < r = o = t, \\ Z: a &< g = ev = b = v = e < l = r = p = t < w = o. \end{aligned}$$

Man sieht, daß beispielsweise a und l ihren Platz vertauschen, wenn man von der einen zur anderen Sequenz übergeht. Je nach betrachtetem Element der IB gelangt man zu einer anderen Bewertung, was als logisch inkonsistent angesehen wird.

Anhand des Hasse-Diagramms lassen sich Sequenzen ableiten, die ebenfalls nach steigender Bedeutung (in den Einzelbewertungen) geordnet sind, aber die erwähnte Mehrdeutigkeit in den Anordnungen der Objekte nicht aufweisen.

Beispielsweise:

$$\begin{aligned} g &< l < p < t < r \\ &\text{oder} \\ g &< v < e < ev < w < o. \end{aligned}$$

Es werden also aus dem Hasse-Diagramm Sequenzen erhalten, in denen – nach dem Konstruktionsprinzip des Hasse-Diagramms – Objekte angeordnet sind, die in bezug auf alle vier Einzelbewertungen gleiche oder ansteigende Werte aufweisen. Die partielle Ordnung drückt sich dadurch aus, daß viele solcher Sequenzen gefunden werden können.

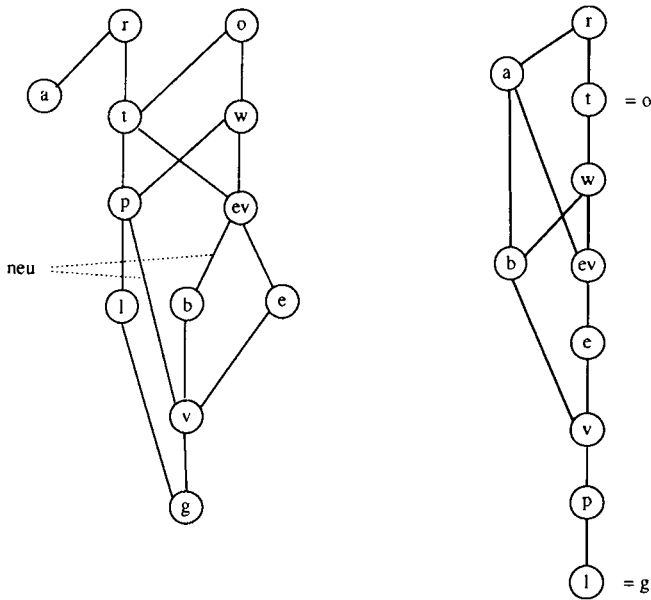
4.4 Analyse der Kriterien ausgehend von Tabelle 1

4.4.1 Bewertung der Kriterien

Für das Ranking der 12 Objekte können die Kriterien einen unterschiedlichen Einfluß haben. Dabei wird der Einfluß in Hinsicht auf die Struktur des Hasse-Diagramms, d.h. auf das System der Vergleichbarkeiten und der Unvergleichbarkeiten, diskutiert: Wie sieht das Hasse-Diagramm aus, wenn eines der Kriterien unberücksichtigt bleibt? Wenn – wie hier – vier Kriterien vorliegen, sind fünf Fälle zu diskutieren:

Der erste Fall ist gegeben durch das Hasse-Diagramm mit allen vier Kriterien, die anderen vier Fälle werden erhalten durch Weglassen jeweils eines Kriteriums. Die Unterschiede zwischen je zwei Hasse-Diagrammen können quantifiziert werden. Dadurch kann man den einzelnen Kriterien ein Maß für ihre Bedeutung für das Ranking zuordnen. Es ergibt sich, daß die Halbwertszeit der Reversibilität (Zk) relativ unwichtig, die zeitliche Änderung (Z) jedoch wichtig ist.

Abb. 2 zeigt diejenigen Hasse-Diagramme, die resultieren, wenn die zeitliche Änderung als Kriterium nicht berück-



Hasse-Diagramm ohne das Kriterium Halbwertszeit der Reversibilität (Zk)

Hasse-Diagramm ohne das Kriterium zeitliche Änderung (Z)

Abb. 2: Hasse-Diagramme mit nur drei der vier Kriterien. Im rechten Diagramm weisen l und g jeweils gleiche Einzelbewertungen in den Kriterien auf, ebenso t und o. Im linken Diagramm sind mit „neu“ Linien gekennzeichnet, die im Hasse-Diagramm in Abb. 1 nicht auftraten. In manchen Fällen werden aus Nachbarn der Abb. 1 nur noch vergleichbare Objekte, wie z.B. das Objektpaar (t, b)

sichtigt wird (rechts) bzw. wenn die Halbwertszeit der Reversibilität unberücksichtigt bleibt (links). Das rechte Diagramm ist wesentlich „schlanker“, d.h., es gibt sehr viel mehr Vergleichbarkeiten als im linken Diagramm, das (wie eine paarweise Einzelbetrachtung der Objekte bestätigt) dem ursprünglichen Diagramm (→ Abb. 1) wesentlich ähnlicher ist. Die Bedeutung der anderen zwei Kriterien liegt zwischen der der Halbwertszeit der Reversibilität und der der zeitlichen Änderung. Die entsprechenden Hasse-Diagramme werden hier nicht gezeigt.

4.4.2 Auswertung anhand eines Verbandes

Zur Unabhängigkeit der Kriterien, d.h. zur Frage, ob die Ausprägung des einen Kriteriums die eines anderen impliziert, gibt die formale Begriffsanalyse [9] Hinweise. Ausgangspunkt für die formale Begriffsanalyse ist der sog. Kontext. Dieser soll wie folgt erzeugt werden: Zwischen einem Objekt O_i und einem Kriterium K_j soll genau dann eine Relation \mathfrak{R} bestehen, wenn in Tabelle 1 eine hohe Einzelbewertung, z.B. ≥ 3 , vorgenommen wurde. So bestehen beispielsweise zwischen t und R sowie zwischen r und Z Relationen \mathfrak{R} , nicht aber zwischen e und Z oder l und I. Die graphische Darstellung der Relation \mathfrak{R} führt wieder auf ein Hasse-Diagramm (→ Abb. 3).

Es seien einige Lesebeispiele gegeben:

1. Von welchen Kriterien mit einer Ausprägung ≥ 3 ist der Ressourcenverbrauch r betroffen? Alle in rechteckigen

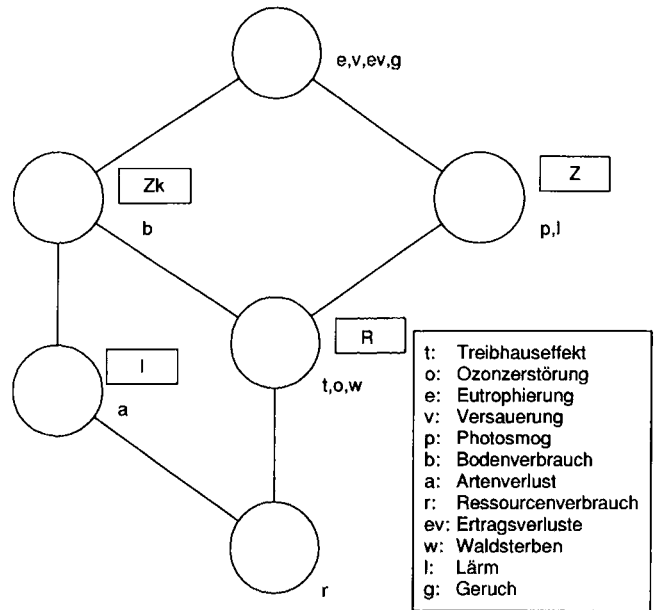


Abb. 3: Hasse-Diagramm zur Relation \mathfrak{R}

Kästchen eingerahmten Kriterien, die von r aus nach oben erreichbar sind, treffen für r zu: In diesem Fall sind dies alle Kriterien.

2. Wodurch unterscheiden sich a einerseits sowie t, o und w andererseits? Das Kriterium Irreversibilität (I) trifft auf a, nicht aber auf t, o und w zu; die Kriterien regionale Betroffenheit (R) und zeitliche Änderung (Z) treffen dagegen auf t, o und w, nicht aber auf a zu. Gemeinsam ist den Objekten a, t, o und w nur die Halbwertszeit der Reversibilität mit einer Ausprägung ≥ 3 .
3. Welche Umweltveränderungen sind durch das Zutreffen bestimmter Kriterien charakterisiert? Beispielsweise Zeit (≥ 3): Davon betroffen sind p, l, t, o, w und r.

Weitere Analysen dieser Art lassen sich durchführen, sind aber nicht sehr interessant, weil das Diagramm so einfach ist und weil hierzu schon das in Abb. 1 gezeigte Hasse-Diagramm nützliche Dienste leistet.

Interessanter sind die Elemente künstlicher Intelligenz [9], die die formale Begriffsanalyse liefert. Diese erzeugt nämlich Regeln in der Form „wenn-dann“, sogenannte Implikationen. Hier findet man:

- (1) Irreversibilität \Rightarrow Halbwertszeit der Reversibilität
- (2) zeitliche Änderung und Zeitkonstante der Reversibilität \Rightarrow regionale Betroffenheit
- (3) regionale Betroffenheit \Rightarrow zeitliche Änderung und Halbwertszeit der Reversibilität

Implikation (1) liest man wie folgt: Wenn die Irreversibilität groß ist, dann ist es auch die Halbwertszeit der Reversibilität. Die Implikation (1) sieht man in Abb. 3 so: Alle Umweltveränderungen, die von Irreversibilität betroffen sind, nämlich a und r, sind auch von einer hohen Halb-

wertszeit für die Reversibilität betroffen. Diese Implikation resultiert allerdings aus der Vergabe der Einzelbewertungen, ist also nicht notwendigerweise kausal begründet. Die Analyse zeigt weiter, daß gilt:

- (4) zeitliche Änderung und Halbwertszeit der Reversibilität \Leftrightarrow regionale Betroffenheit.

Das heißt, alle Umweltveränderungen, die hohe Ausprägungen in den Kriterien zeitliche Änderung und Halbwertszeit der Reversibilität haben, haben auch eine hohe Ausprägung in bezug auf das Kriterium regionale Betroffenheit und umgekehrt. Davon sind t, o, w und r betroffen. Implikationen, wie (1) bis (3), oder die Äquivalenz (4) lassen sich anhand der **Tabelle 1** leicht verifizieren, dürften aber ohne die gezeigten mathematischen Hilfsmittel nicht von vornherein erkannt werden.

4.5 Hasse-Diagramme bei abgeänderten Ausprägungen für die einzelnen Kriterien

In Kapitel 2.3 wurde bereits dargelegt, daß der Zahlenwert und damit die Wichtung der Kriterien R, Z, Zk und I für eine bestimmte Umweltveränderung subjektiv ist. An einem Beispiel soll daher der Einfluß einer veränderten Bewertung des Kriteriums R (regionale Betroffenheit) im Falle des Ressourcenverbrauchs aufgezeigt werden.

Die regionale Betroffenheit für das Objekt Ressourcenverbrauch muß nicht notwendigerweise die höchste Einstufung haben, wenn man an mehr lokale Ressourcen denkt. Wird daher die Einstufung im Kriterium regionale Betroffenheit von 4 zu 3 abgeändert, so entsteht ein Hasse-Diagramm (\rightarrow *Abb. 4*), das im Vergleich zum Hasse-Diagramm in *Abb. 1* folgende Linien neu enthält: r - p, r - b und r - ev. Die Linie r - t tritt nicht mehr auf; der Res-

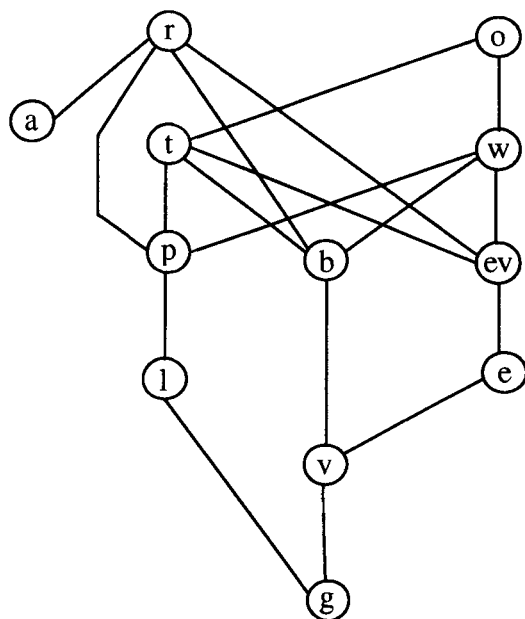


Abb. 4: Hasse-Diagramm mit modifizierter Bewertung für den Ressourcenverbrauch bezüglich regionaler Betroffenheit (statt 4 (\rightarrow *Abb. 1*) jetzt: 3)

sourcenverbrauch ist damit nicht mehr in allen Kriterien schlechter bewertet als der Treibhauseffekt, wie es noch in *Abb. 1* der Fall war.

Die hier durchgeführte Modifizierung der Bewertung muß nicht die einzige sein: So könnten der Bodenverbrauch und die Versauerung in bezug auf die Irreversibilität statt mit 0 auch mit 1 bewertet werden. Zusammen mit der Abstufung des Ressourcenverbrauchs von 4 auf 3 in bezug auf die regionale Betroffenheit ergibt sich ein modifiziertes Hasse-Diagramm (\rightarrow *Abb. 5*).

Neben den bereits angesprochenen Veränderungen gegenüber dem Hasse-Diagramm der *Abb. 1* kommen noch hinzu: Der Bodenverbrauch wird nun als in allen Aspekten vergleichbar schlechter als die Ertragsverluste eingestuft. Die Eutrophierung und die Versauerung fallen zusammen. Die Ertragsverluste sind nach wie vor günstiger beurteilt als der Treibhauseffekt. In *Abb. 1* waren ev und t benachbart; in *Abb. 5* sind sie zwar miteinander verbunden, aber nicht mehr benachbart.

4.6 Hasse-Diagramm zur Mustererkennung

Unvergleichbarkeiten, d.h. das Fehlen von Verbindungen im Hasse-Diagramm, weisen auf qualitative Unterschiede bezüglich der verwendeten Kriterien hin. Die Verhältnisse werden evident, wenn man anstelle der Objektbezeichnungen die Ausprägungen für jedes Kriterium in Form von Balkendiagrammen einzeichnet. Man sieht, wie einerseits, von den maximalen Elementen ausgehend, sich auffallend niedrige Balken nach unten durchprägen und noch kleiner werden und wie andererseits, von den minimalen Elementen beginnend, auffallend hohe Werte auf den Linienzügen nach oben erhalten bleiben oder noch größer werden (\rightarrow *Abb. 6*).

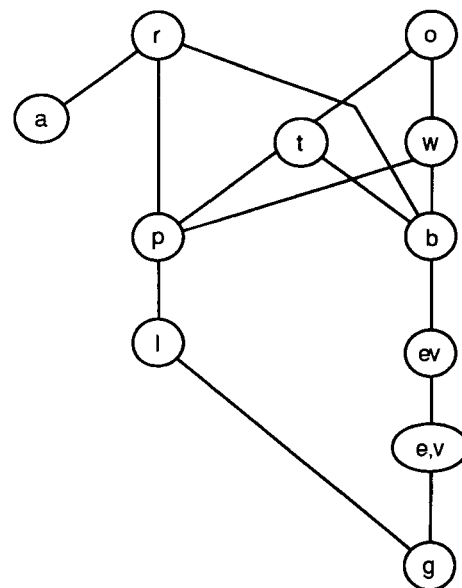


Abb. 5: Hasse-Diagramm. Gegenüber *Tabelle 1* und *Abb. 1* ist das Kriterium regionale Betroffenheit (R) im Falle des Ressourcenverbrauchs mit 3 statt 4 und das Kriterium Irreversibilität (I) bei Bodenverbrauch und Versauerung mit 1 statt 0 bewertet

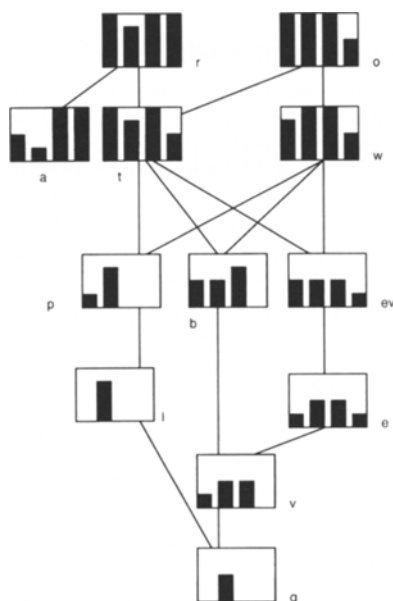


Abb. 6: Hasse-Diagramm mit Ausprägungen in den einzelnen Kriterien laut Tabelle 1. Die Balken geben die Ausprägungen der Elemente der Informationsbasis in der Reihenfolge R, Z, Zk, I an (von links nach rechts)

Zum Beispiel hat das zweite Kriterium Z im kleinsten Element, d.i. Objekt g, bereits einen mittelhohen Wert. Kein anderes Objekt, das von g aus erreicht werden kann, kann dann nach Definition der Ordnungsrelation einen kleineren Wert hierfür aufweisen.

Die relativ geringe Ausprägung für die Irreversibilität im Objekt o, einem der maximalen Elemente, kann von den Objekten, die von o aus nach unten erreicht werden können, nur unterschritten werden. Es gibt zehn solcher Objekte.

5. Ausblick

Vergleichende Bewertungen sind unter Berücksichtigung aller erhältlichen Informationen durchzuführen. Dies führt dazu, daß Objekte (hier also regionale bis globale Umweltveränderungen) durch mehrere Komponenten bewertet werden. In Konsequenz ist eine verallgemeinerte binäre Relation zwischen den Objekten der Objektmenge zu analysieren – die Ordnungsrelation. Die Theorie von partiell geordneten Mengen wurde schon in verschiedenen Gebieten erfolgreich angewendet und in der vorliegenden Artikelserie beispielhaft erläutert für Biomarker und Untersuchungen zum Einfluß von Huminstoffen auf die Ökotoxizität von Chemikalien [10], aquatische Wirkungstests und ihre Anwendungsbereiche [11] sowie Umweltveränderungen und der aus bestimmten Kriterien resultierende Handlungsbedarf (diese Arbeit). Weitere Anwendungsgebiete sind in methodisch orientierten Arbeiten behandelt worden: Bewertung von Regionen bezüglich ihres Belastungszustandes [12, 13], Bewertung von Chemikalien [6, 14], Vergleich mathematischer Modelle [15, 16], Standorte von Deponien [8], Vergleich von aquatischen Tests hinsichtlich

ihrer Aussagekraft [11, 17], histopathologische, klinisch-chemische Fischtests [3], Phospholipidfettsäuremuster zur Beurteilung des mikrobiellen Besatzes in verschiedenen Böden [5], Struktur-Wirkungsbeziehungen [18, 19, 20] und umweltrelevante Datenbanken [21, 22].

Trotz zahlreicher Anwendungen bleiben Fragen offen, die teilweise in dieser Arbeit angesprochen wurden.

- Wie behandelt man fehlendes oder unsicheres Wissen innerhalb der Hasse-Diagrammtechnik?
- Wie kann man die Vorteile der Visualisierung mittels Hasse-Diagrammen wahren, auch wenn die Zahl der Objekte sehr groß wird?
- Wie kann – prognostisch – die Qualität der Informationsbasis beurteilt werden?

Diese Fragen werden derzeit bearbeitet, haben aber noch keine abschließenden Antworten gefunden. Ein Zugang zu Elementen künstlicher Intelligenz wurde skizziert; hier wird ein erhebliches Potential gesehen, Ergebnisse verfeinerter chemischer Analytik, Resultate der hochentwickelten Technik der Biomarker innerhalb ökosystemarer Untersuchungen sowie Auswertungen dynamischer Modelle zur Ausbreitung und Wirkung von Chemikalien für vergleichende Bewertungen zu nutzen.

Der Grad an Subjektivität, der in den Einzelbewertungen zu konstatieren ist, würde durch die Verwendung eines Rangfolgeindex eine zusätzliche Steigerung erfahren, da die Bildung eines Rangfolgeindex nicht notwendig in Form von Gleichung (3–1) erfolgen muß, und andererseits innerhalb der gewählten funktionalen – linearen – Form auch die Gewichte willkürlich – also subjektiv – sein können. Dies wird in der Hasse-Diagrammtechnik vermieden.

Die Nachteile der Hasse-Diagrammtechnik, nämlich die mögliche Unübersichtlichkeit der graphischen Darstellung bei hoher Zahl von Objekten und die ordinale Interpretation physikalisch nicht sinnvoller Zahlenunterschiede, werden wettgemacht durch die Möglichkeiten, komplexe Datenstrukturen zu visualisieren und die Vermeidung willkürlicher Konstruktionen von Rangfolgeindizes.

6 Literatur

- [1] N.N.: Die Industriegesellschaft gestalten. Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen. Hrsg.: Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 12. Deutschen Bundestages. Economica Verlag, Bonn (1994)
- [2] LENZ, R.: Systemökologische Anforderungen an ein Umweltforschungsinformationssystem (UFIS) als operationale Basis für Scaling-Konzepte in der Umweltplanung. Informatik aktuell, Tagungsband für 7. Symposium Informatik für den Umweltschutz, Ulm, 31.3.-2.4.1993, (Hrsg.: A. JAESCHKE et al.), Springer-Verlag, 427–440 (1993)
- [3] BRÜGGEMANN, R., SCHWAIGER, J., NEGELE, R. D.: Applying Hasse Diagram Technique on the Evaluation of Toxicological Fish Tests. Chemosphere 30, 1767–1780 (1995)
- [4] DAVEY, B. A., PRIESTLEY, H. A.: Introduction to Lattice and Order. University Press, Cambridge, Great Britain (1990)
- [5] BRÜGGEMANN, R., ZELLES, L., BAI, Q. Y., HARTMANN, A.: Use of Hasse diagram technique for evaluation of phospholipid fatty acids distribution as biomarkers in selected soils. Chemosphere 30, 1209–1228 (1995)

- [6] HALFON, E., REGGIANI, M. G.: On ranking chemicals for environmental hazard. *Environ. Sci. Technol.* 20, 1173–1179 (1986)
- [7] BRÜGGEMANN, R., MÜNZER, B.: A graph-theoretical tool for priority setting of chemicals. *Chemosphere* 27, 1729–1736 (1993)
- [8] HALFON, E.: Comparison of an index function and a vectorial approach method for ranking waste disposal sites. *Environ. Sci. Technol.* 23, 600–609 (1989)
- [9] WILLE, R.: Bedeutungen von Begriffsverbänden: Beiträge zur Begriffsanalyse (Hrsg.: GANTER, B., WILLE, R., WOLFF, K.E.), BI Wissenschaftsverlag, Mannheim, 161–211 (1987)
- [10] BRÜGGEMANN, R., KAUNE, A., ZELLES, L., HARTMANN, A., STEINBERG, C.: Einsatz der Hasse-Diagrammtechnik zur vergleichenden Datenanalyse von Biomarkerantworten und ökotoxikologischen Tests. *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.* 7 (5) 265–274 (1995)
- [11] BRÜGGEMANN, R., STEINBERG, C.: Einsatz der Hasse-Diagrammtechnik zur vergleichenden Bewertung von aquatischen Wirkungstests: *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.* 7 (6) 323–331 (1995)
- [12] BRÜGGEMANN, R., MÜNZER, B., HALFON, E.: An algebraic/graphical tool to compare ecosystems with respect to their pollution – The German River „Elbe“ as an example – I: Hasse-Diagrams. *Chemosphere* 28, 863–872 (1994)
- [13] MÜNZER, B., BRÜGGEMANN, R., HALFON, E.: An algebraic/graphical tool to compare ecosystems with respect to their pollution. II: Comparative regional analysis. *Chemosphere* 28, 873–879 (1994)
- [14] BRÜGGEMANN, R., BEHRENDT, H., SEILER, K.-P., TRAPP, S., VOIGT, K.: Einsatz der HASSE-Diagrammtechnik zum Vergleich von Chemikalien hinsichtlich ihrer Umweltgefährdungspotentiale. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen* 38, 122–127 (1994)
- [15] HALFON, E.: Is there a best model structure? I: Modelling the fate of a toxic substance in a lake. *Ecological Modelling* 20, 135–152 (1983)
- [16] HALFON, E.: Is there a best model structure? II: Comparing the model structures of different fate models. *Ecological Modelling* 20, 153–163 (1983)
- [17] STEINBERG, C., BRÜGGEMANN, R., HARTMANN, A., HELLER, W., KIRCHNER, M., LIENERT, D., MÜLLER, K., PESTLIN, G., SCHEUNERT, I., SEILER, K.-P., ERNST, D., SPIESER, O. H., KLEIN, J.: Ökotoxikologische Testverfahren. *Handbuch des Umweltschutzes* 79. Erg. Lfg. 6/95, Chemie und Umwelt II–1.3 (1995)
- [18] RANDIC, M.: The nature of chemical structure. *J. Math. Chem.* 4, 157–184 (1990)
- [19] BRÜGGEMANN, R., ALTSCHUH, J.: A validation study for the estimation of aqueous solubility from *n*-octanol/water partition coefficients. *Sci. Tot. Environ.* 109/110, 41–57 (1991)
- [20] MAGGIORA, G. M., JOHNSON, M. A.: Introduction to similarity in chemistry. In: *Concepts and Applications of Molecular Similarity* (Eds.: M. A. JOHNSON, G. M. MAGGIORA), J. Wiley & Sons, New York, 1–13 (1990)
- [21] VOIGT, K., BRÜGGEMANN, R., BENZ, A.: Umwelt-relevante Datenbanken – Online Datenbanken und CD-ROMs. *UWSF – Z. Umweltchem. Ökotox.* 7 (4) 226–233 (1995)
- [22] VOIGT, K., BRÜGGEMANN, R.: Toxicology databases in the metadatabank of online databases. *Toxicology* 100, 225–240 (1995)

Eingegangen: 18. September 1995
Akzeptiert: 24. November 1995

Zu [10] Zusammenfassung

Die Ökotoxikologie muß sich mit biologischen Systemen und ihren Antworten auf schadstoffinduzierten Streß auseinandersetzen. Die hierzu verwendete experimentelle Technik eilt dabei den Möglichkeiten dynamischer, prozeßorientierter mathematischer Modellierung weit voraus.

In dieser methodisch orientierten Arbeit werden Techniken aus der mathematischen Disziplin der Verbandstheorie vorgestellt, die eine Datenanalyse unter den Aspekten vergleichender Bewertung erlauben. Wichtige Ergebnisse sind dabei

- Aussagen zur Diversität mikrobieller Systeme (soweit durch die hier verwendeten Muster von vier Phospholipidfettsäuren erfassbar),
- Analysen ordinaler Abhängigkeiten sowie
- komprimierte Darstellung komplexer Befunde im Zusammenhang mit der Toxizität von Huminstoff-Chemikalien-Systemen.

Zu [11] Zusammenfassung

In eine ökotoxikologische Bewertung von Schadstoffen müssen die Ergebnisse von Wirkungstests einfließen. Die Qualität der Bewertung im ökosystemaren Kontext steht und fällt mit der ökosystemaren Qualität der Tests. In der vorliegenden Arbeit wird eine Bestandsaufnahme aquatischer Wirkungstests (unabhängig von bestehenden legislativen Vorgaben) vorgenommen, und es werden die Ergebnisse in einer Tabelle zusammengestellt, die Einsatzbereiche, Anwendbarkeit für mathematische Wirkungsmodellierung und ökosystemare Relevanz enthält. Die hieraus resultierende Tabelle ist schwer zu überblicken und Zusammenhänge zwischen bestimmten Wirkungstests sind kaum überschaubar. So ist auch eine Einstufung der aquatischen Wirkungstests ohne zusätzliche mathematische Hilfsmittel schwierig. Hier wird gezeigt, wie anhand der Technik der HASSE-Diagramme die Einstufung der Wirkungstests nach ihrer Qualität erleichtert wird. Es zeigt sich u.a., daß es keinen Test gibt, der alle Anforderungen gleichzeitig erfüllt. Einerseits gibt es sechs Tests, die – nach ihren Einsatzbereichen und nach ihrer Umsetzbarkeit für die mathematische Modellierung beurteilt – zwar optimal sind, aber keine ökosystemare Relevanz aufweisen. Andererseits gibt es zwei Tests, die besonders ausgezeichnet sind: Einer (Test 8), der drei Einsatzbereiche aufweist und gleichzeitig sowohl für die mathematische Modellierung geeignet, als auch ökosystemar relevant ist, und einer, der in zwei anderen Einsatzbereichen positiv beurteilt wurde und noch ökosystemar interessant ist (Test 54). Es zeigt sich, daß zwischen Tests mit breitem Einsatzbereich und solchen, die ökosystemar relevant sind, eine Lücke klafft.

Zu [21] Zusammenfassung

Datenbanken zum Thema Umweltschutz finden zunehmendes Interesse in der Fachwelt und der Öffentlichkeit. Große Datenbankanbieter (Hosts) haben dies erkannt und unterstützen die Suche nach umweltrelevanten Informationen. Im Informationssystem Umweltchemikalien werden seit einigen Jahren in der GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen Metadatenbanken im Fachgebiet „Umweltschutz und Chemikalien“ entwickelt und gepflegt. Die Bewertung der Datenbanken stellt einen wichtigen neuen Forschungsschwerpunkt dar. Dabei werden Hasse-Diagramme zur Anwendung gebracht.