

Zahlreiche Umweltprobleme sind nach wie vor ungelöst und spitzen sich weiter zu, und dies trotz vieler Erfolge in der Umweltpolitik sowie Fortschritten in den Umweltwissenschaften. Beispiele sind der Rückgang der Fischpopulationen, die Verkehrszunahme und der fortschreitende Landschaftsverbrauch. Trotz der Flut wissenschaftlicher Daten sind viele Fragen über die relevanten Problemzusammenhänge unbeantwortet geblieben. Auf globaler Ebene zeigen dies die kontroversen Diskussionen über den Klimawandel und über den Schwund der Biodiversität. Hat sich die heutige Umweltforschung verselbständigt und von den realen Problemen entkoppelt? Hat sie in der Hektik des Wissenschaftsbetriebs die Verbindung zur Umweltpolitik aus den Augen verloren? Oder hat die Politik falsche Erwartungen an die Umweltforschung gestellt, die prinzipiell nicht erfüllbar sind? Welche grundlegenden Konflikte sind hier in den letzten Jahren erkennbar geworden, und wie kann man ihnen begegnen? **Abstract & Keywords** ↪ p. 159

Wozu Umweltforschung? – Über das Spannungsverhältnis zwischen Forschungstraditionen und umweltpolitischen Leitbildern

Teil I: Das Beispiel "Ökologische Chemie"¹⁾

Martin Scheringer*, Stefan Bösch und Jochen Jaeger

1. Eilen die Umweltprobleme der Umweltforschung davon?

Am 31. Mai 2000 berichtet die Neue Zürcher Zeitung über einen dramatischen Rückgang der Fischbestände in Flüssen und Seen der Schweiz. Als mögliche Ursachen werden die Wirkungen zahlreicher anthropogener Chemikalien angesehen, die in geringen Konzentrationen in den Gewässern enthalten sind^[1].

Die Verfahren zur Chemikalienbewertung in der EU sind zu kompliziert und zu langsam für die Bewertung von 100 000 existierenden Chemikalien (Altstoffen) und mehreren 100 Neustoffen pro Jahr, wie die langwierigen Risikobeurteilungen von bislang nur etwa 20 Altstoffen auf europäischer Ebene gezeigt haben^[2] (in Deutschland wurden bisher etwa 280 Altstoffe vom Beratergremium für umweltrelevante Altstoffe (BUA) beurteilt^[3]).

Im Bericht *Environment in the European Union at the Turn of the Century* der *European Environment Agency* (EEA) wird im Kapitel *Hazardous Substances* konstatiert: »The chemicals intensity and dangerous chemicals intensity of the EU economy (production plus import per unit of Gross Domestic Product) have been increasing since 1993. (...) [A] growth of 30% to 50% in chemicals output is expected for most of the EU countries by 2010 as a result of increasing economic activity, including road transport and agricultural production.«^[4]

Diese drei Beispiele zeigen, daß die Umweltschäden durch Chemikalien auch heute weiter voranschreiten, und zwar nicht nur in besonderen Problemgebieten wie Altlastenzonen, sondern flächendeckend in Europa.²⁾ Waren die Umweltforschung, die Chemiepolitik, die Anstrengungen der chemischen Industrie der letzten 40 Jahre also fruchtlos? Mit Sicherheit nicht, trotz der beunruhigenden Befunde der jüngsten Zeit. Heute gibt es eine deutlich verbesserte Luftreinhaltung und verminderte Abwasserfrachten; eine nationale und EU-übergreifende Chemikaliengesetzgebung wurde aufgebaut; internationale Abkommen über die Dokumentation

von Stoffemissionen, über Monitoringprogramme und Bewertungsverfahren wurden abgeschlossen, und Stoffbewertungsprogramme wurden begonnen. Die industrielle Produktion hat eine höhere Energie- und Materialeffizienz, und es wurden viele neue Produkte und Produktionsprozesse entwickelt, die geringere Umweltbelastungen darstellen^[5, 6]. Schließlich gibt es seit gut 10 Jahren eine Nachhaltigkeitsdebatte, an der sich

¹⁾ Für hilfreiche Kommentare danken wir Ralf Donner, Michael Esfeld, Beatrix Falch, Patricia Fry, Marco Morosini, Holger Hoffmann-Riem, Konrad Hungerbühler, Ludwig Trepl sowie drei Gutachtern.

²⁾ »Environmental policy may have eased some problems, but economic and sectoral policies beyond the control of environmental policy have created new and bigger ones«, sagt D. Jimenez-Beltran, *Executive Director* der EEA, in einem Interview über den EEA-Bericht [12]. Im Anschluß an dieses Interview heißt es weiterhin: »What is needed, the [EEA] report says, is less time between identifying problems and implementing solutions and more coordination among environmental policies.« [12a] Die Chemikalienbelastung ist jedoch nicht das einzige nach wie vor drängende Umweltproblem. Gravierend sind unter anderem der Flächenverbrauch sowie die Landschaftszerschneidung und der daraus resultierende Artenschwund, die Emission von Treibhausgasen und andere mehr, vergleiche Referenz [4].

*Postadresse : Dr. M. Scheringer
Gruppe für Umwelt- und Sicherheitstechnologie
Laboratorium für technische Chemie
ETH Hönggerberg, HCI G127
CH-8093 Zürich (Schweiz)
E-Mail: scheringer@tech.chem.ethz.ch

die chemische Industrie unter anderem mit dem Programm *Responsible Care* beteiligt⁷⁾ – doch genau hier zeigen sich auch die verbleibenden Schwierigkeiten: Die Nachhaltigkeitsdebatte wird sowohl in der Öffentlichkeit wie in der Wissenschaft nicht intensiv genug geführt^{[8–11], 3)} Die naturwissenschaftliche Umweltforschung tendiert dazu, sich disziplinar einzurichten, wodurch die Übersetzung der "Nachhaltigkeitsproblematik" in konkrete Forschungsfragen erschwert wird: Die Forschung wird stark durch etablierte Forschungsstraditionen bestimmt, gegen die sich ein von außen herangetragener Anspruch auf Nachhaltigkeitsforschung erst behaupten muß.

Neben solchen Hindernissen für die Übersetzung der Nachhaltigkeitsproblematik in wissenschaftliche Forschung ergeben sich Probleme auch beim umgekehrten Prozeß, bei der Nutzung wissenschaftlicher Resultate als Entscheidungsgrundlagen in Politik und Unternehmen: Die Umsetzung gewonnener Erkenntnisse ist stockend und bruchstückhaft.

Wissenschaft einerseits und Politik und Unternehmen andererseits haben verschiedene Handlungslogiken.⁴⁾ Wissenschaftliche Forschung liefert nicht nur "gesicherte Erkenntnis" als Entscheidungsgrundlage für externe Entscheidungsträger, sondern sie führt generell, vor allem aber bei der Untersuchung der sehr komplexen Umweltproblematik, immer auf neue offene Fragen und Unsicherheiten^[14]. Außerdem sind auch die – soweit möglich – gesicherten Resultate der Forschung oft nicht unmittelbar handlungsrelevant; teilweise laufen sie ganz am umweltpolitischen Bedarf vorbei.⁵⁾

3) Zumindest werden aber Lokale-Agenda-21-Projekte umgesetzt [13].

4) Nach N. Luhmann führt die funktionale Differenzierung gesellschaftlicher Subsysteme dazu, daß übergreifende Probleme nur aus der jeweiligen "Systemsicht" bearbeitet werden können [16], was ihre übergreifende Bearbeitung stark erschwert. Im Gegensatz dazu vertritt Beck die These, daß gerade die Konfrontation des wissenschaftlich-technischen Systems mit den selbsterzeugten Umweltproblemen (Reflexivität, siehe Exkurs 1) eine Auseinandersetzung mit den Problemen erzwingen wird [17].

5) »At present, some of the systems used for monitoring and gathering information about the environment in European countries are inefficient and wasteful. They generate excessive amounts of data on subjects which do not need it, and fail to provide timely and relevant information on other subjects where there is an urgent policy need for better-focused information, as well as consistent environmental assessment and reporting.« (Derek Osborne, EEA, zitiert nach [12b])

Die klassischen Naturwissenschaften verstehen sich einerseits als frei von Bezügen zu Werturteilen und Handlungen. Andererseits beruhen die Ingenieurwissenschaften – und in ihrer Wurzel auch die grundlagenorientierten Naturwissenschaften – auf dem Baconischen Programm, das die Wissenschaft unmittelbar auf die Lösung externer Probleme und vor allem die Behebung materiellen Elends verpflichtete^[15]. Der Handlungsbezug der Ingenieurwissenschaften umfaßt somit im wesentlichen das Ziel der praktischen Nutzbarkeit technischer Konstruktionen. Fragen der Art, wie sich menschliche Handlungen auf die Umwelt auswirken und wie sie normativ zu bewerten sind, sind jedoch – offensichtlich – nicht Gegenstand der Ingenieurwissenschaften; um solche Fragen geht es jedoch bei den hier vorgestellten Überlegungen zum Handlungsbezug der Umweltforschung.

Vor diesem Hintergrund untersuchen wir die bisherige Rolle sowie mögliche zukünftige Ausrichtungen der naturwissenschaftlichen Umweltforschung im Hinblick auf die Lösung von Umweltproblemen. Unsere Ausgangsthese sind dabei:

1. Umweltpolitik muß sich – so die allgemeine Sicht, die auch wir teilen – in wesentlichen Punkten auf umweltwissenschaftliche Resultate stützen. In dieser Situation ist die naturwissenschaftliche Umweltforschung jedoch ihrerseits mit dem Problem konfrontiert, sich zwischen etablierten Forschungsstraditionen einerseits und wissenschaftsexternen umweltpolitischen Leitbildern andererseits orientieren zu müssen. Dieses Problem – das wir hier als das "*Orientierungsproblem*" bezeichnen – besteht darin, daß auf die folgenden vier Fragen sehr unterschiedliche Antworten gegeben werden können: (1) Worin wird das Erkenntnisdefizit gesehen und welche Art von Resultat wird angestrebt? (2) Zu welchen Zwecken sollen die Resultate dienen? (3) Was ist der Gegenstand der Untersuchung? (4) Was sind geeignete Methoden dafür?

2. Indem man die Aufgabe der naturwissenschaftlichen Umweltforschung auf die Bereitstellung von Wissen über Kausalzusammenhänge beziehungsweise Dosis-Wirkungs-Beziehungen reduziert (so in Referenz^[18]), läßt sich das Orientierungsproblem nicht lösen. Die naturwissenschaftliche Umweltforschung benötigt neben dem Ziel, Kausalwissen zu erarbeiten (dies ist unstrittig ein wesentliches Element eines wissenschafts-internen Leitbildes), auch Leitbilder, die den wissenschaftsexternen Bedarf an

entscheidungsrelevantem Wissen repräsentieren und es erleichtern, in der Forschung auf diesen Bedarf einzugehen.

Im folgenden Abschnitt gehen wir darauf ein, was wir unter "wissenschafts-internen" und "wissenschaftsexternen" Leitbildern im einzelnen verstehen. In Abschnitt 3 stellen wir als ein Fallbeispiel die Entwicklung der ökologischen Chemie in Deutschland seit den sechziger Jahren dar. In einem nachfolgenden Artikel^[19] werten wir dieses Fallbeispiel aus und diskutieren drei wichtige Problembereiche: Umgang mit Unsicherheit, das Verhältnis zwischen internen und externen Leitbildern sowie das Verhältnis zwischen Umweltforschung und anderen Akteuren wie Politik und Industrie.

2. "Externe" und "interne" Leitbilder für wissenschaftliche Forschung

2.1. Das "Datendilemma"

Warum ist die Umweltforschung mit einem Orientierungsproblem konfrontiert? Der Hauptgrund liegt darin, daß die Erkenntnisgewinnung der Umweltforschung auf der einen und der wissenschaftsexterne Wissensbedarf auf der anderen Seite auseinanderfallen:

- Einerseits mangelt es trotz der Fülle naturwissenschaftlicher Erkenntnisse bei vielen Umweltproblemen nach wie vor an einer ausreichenden wissenschaftlichen Grundlage für die Entwicklung und Bewertung von Handlungsalternativen.
- Andererseits ist die Wissensproduktion so unübersichtlich und heterogen geworden, daß sich sehr unterschiedliche und zum Teil widersprüchliche Schlußfolgerungen aus der Datenflut ziehen und durch wissenschaftliche Befunde untermauern lassen.

Diese Diskrepanz bezeichnen wir im weiteren abkürzend als das *Datendilemma*.

Das Datendilemma hat wichtige Konsequenzen für die wissenschaftliche Politikberatung: Das "puristische Modell"^[20] mit seiner strikten Aufgabentrennung von Politik und Wissenschaft, in welchem die Wissenschaft in prinzipieller Unabhängigkeit von der Politik auf die Vermehrung gesellschaftlich verfügbaren Wissens zielt, scheitert bei den heutigen Umweltproblemen am Datendilemma. Die Wissenschaft kann ihre Aufgabe, wissenschaftliche Ergebnisse als *Bausteine der Entscheidungsfindung* bereit-

zustellen, auf diesem Wege nicht erfüllen.

Bereits Schäfer betont, daß eine weitere Ankurbelung der umweltnaturwissenschaftlichen Datenproduktion keine geeignete Strategie zur Überwindung des Datendilemmas ist, und er benennt auch die Richtung, in die sich die Umweltforschung verändern muß, um das Datendilemma zu bewältigen: »J. Passmore hat darauf hingewiesen, daß unser derzeitiges Wissen objektiv betrachtet zwar immens ist, gemessen jedoch an dem Wissen, das wir haben müßten, um die ökologischen Probleme rational traktieren zu können, eher wie ein Nichtwissen erscheint.⁶⁾ Dieses Nichtwissen läßt sich jedoch nicht dadurch beheben, daß wir noch mehr in eine Forschung herkömmlichen Stils investieren, daß wir unser Wissen der Quantität nach weiter steigern. Die Schwierigkeit, vor der wir stehen, hat mehr mit der Bestimmung des Wissens als Handlungsgrundlage zu tun und mit dem Verhältnis von Wissen und Handeln.«^[15a]

Zur Bewältigung des Datendilemmas müssen die Forschungsergebnisse somit einen *ausreichend starken Handlungsbezug* haben.⁷⁾ Handeln ist der Gegensatz zu *Geschehen*. Eine stärkere Beziehung zwischen (Umwelt-)Wissen und Handeln herzustellen, bedeutet für die Forschenden, Umweltveränderungen nicht – oder zumindest nicht nur – auf dieselbe Weise wie aktorsunabhängiges, naturwüchsiges Geschehen zu untersuchen. Dies ist zwar möglich, bewältigt aber das Datendilemma in der Regel nicht: Bisher analysiert die Umweltforschung Handlungsfolgen überwiegend mit denselben Konzepten, mit denen Naturgeschehen untersucht wird. Das heißt aber, daß sie den fundamentalen Unterschied zwischen Geschehen und Handeln übersieht. Die Übernahme von Verantwortung und die Anwendung von Gerechtigkeitsprinzipien beispielsweise sind nur für Handeln, nicht aber für Geschehen möglich. Die Nichtbeachtung des Unterschiedes hat zur Folge, daß die wissenschaftlichen Ergebnisse oft nicht anschlussfähig und somit letztlich nutzlos für die Entscheidungsfindung sind. Ein Beispiel aus der Klimaforschung ist die Erzeugung von Daten zum künftigen Meeresspiegelanstieg und die Abschätzung ihrer Unsicherheit^[21] ohne Bezugnahme auf Handlungsmöglichkeiten und Handlungszwänge.⁸⁾ Daher muß die Umweltforschung um einen expliziten Handlungsbezug ergänzt werden. Dieser, so unsere These, läßt sich insbesondere durch eine Abstützung der Untersuchungskonzepte

auf normative Leitbilder wie Nachhaltigkeit und Vorsorgeprinzip erzielen. Erst dadurch werden die Ergebnisse anschlussfähig im Prozeß der Entscheidungsfindung.

Warum können die vier Orientierungsfragen aus Abschnitt 1 in der Umweltforschung nicht auf die gleiche Weise wie in den klassischen Naturwissenschaften beantwortet werden? Um dies zu klären, fragen wir, woran sich die klassischen Naturwissenschaften orientieren, wenn sie die angestrebte Art der Resultate sowie Gegenstand und Zweck der Untersuchung festlegen. Anschließend benennen wir die Unterschiede zur Umweltforschung. Wir grenzen schließlich vier Bereiche ab, in denen wir die Auswirkungen des Orientierungsproblems und des Datendilemmas genauer beleuchten und die wir im Folgeartikel (Teil II: Zum Leitbild "Reflexive Umweltforschung"^[19]) weiter untersuchen.

2.2. Leitprinzipien in den klassischen Naturwissenschaften und die Unterschiede zur Umweltforschung

Um Orientierungsfragen zu beantworten, sind Leitbilder oder Leitprinzipien erforderlich. Leitbilder bündeln Zielvorstellungen, sie reduzieren für die Handelnden die Komplexität der sie umgebenden Welt und strukturieren die Aktivitäten in den einzelnen Handlungsfeldern vor. Leitbilder sind auch Orientierungsrahmen für die Konzeption von Forschungsarbeiten. Beispiele für die in den klassischen Naturwissenschaften wie Physik, Chemie und Biologie, aber auch Geologie und Astronomie wirkenden Leitvorstellungen für "gute Wissenschaft" sind:

- die Darstellung von Kausalzusammenhängen in Form funktionaler Abhängigkeiten, insbesondere die Ermittlung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen (Wirkungsanalysen);
- die Entwicklung von Ordnungsschemata zur Systematisierung von Erkenntnis, zum Beispiel Periodensystem der Elemente, biologische Taxonomien;
- die Strukturierung, Einordnung und Vereinheitlichung von Theorien (zum Beispiel die Zusammenführung von raum-zeitlichen Invarianzen und physikalischen Erhaltungssätzen oder der Aufbau von Evolutionstheorien);
- die Gewinnung von Systemverständnis, vor allem bezüglich Aufbau, Reaktionsverhalten und Sensitivität der Systeme;
- eine möglichst weitgehende Vollständigkeit der wissenschaftlichen Untersu-

chung, das heißt, daß alle innerhalb des disziplinären Rahmens prinzipiell möglichen Einflußgrößen, Wirkungsmechanismen und die verbleibenden Unsicherheiten genannt und systematisch geklärt werden müssen, wobei allerdings andere Wissensformen ausgegrenzt bleiben.

Diese wissenschaftsinternen Leitprinzipien, die sich im Laufe der letzten dreihundert Jahre herausgebildet haben, sind durch ihre Tradition fest in den Naturwissenschaften verankert. Weiterhin hat Merton^[22] auf der Grundlage seiner wissenschaftssoziologischen Analysen folgende vier Prinzipien herausgearbeitet, die das Ethos moderner (Natur-)Wissenschaft charakterisieren:

- Universalismus, das heißt Gültigkeit der ermittelten Zusammenhänge unabhängig von Zeit und Raum sowie von der individuellen Persönlichkeit der forschenden Personen;
- organisierter Skeptizismus;
- Kommunismus, das heißt die Resultate werden frei zugänglich gemacht;
- Uneigennützigkeit der Forschung.

Die obigen Leitprinzipien für "gute Wissenschaft" in Verbindung mit diesen vier Elementen des Ethos moderner Wissenschaft fassen wir im Leitbild der "klassischen Naturforschung" zusammen. Der Handlungsbezug dieses Leitbildes ist auf die Tätigkeit der Forschenden für die Erkenntnisgewinnung beschränkt; dies wurde durch das Postulat der Werturteilsfreiheit auch normativ eingefordert. Demnach war man bestrebt, sich von externen Bezügen möglichst frei zu machen und das Handeln, Planen und Entscheiden ganz der politischen Auseinandersetzung in einer Gesellschaft zu überlassen.⁹⁾

⁶⁾ L. Schäfer verweist hier auf J. Passmore: *Man's Responsibility for Nature*, Duckworth, London (1980), p. 177.

⁷⁾ Vergleiche auch Referenz [9a].

⁸⁾ Vergleiche Referenz [9b]: »Auffallend ist bei vielen der bisherigen Konkretisierungsversuche [von nachhaltiger Entwicklung] ein spürbarer Mangel an differenzierten Untersuchungen der Handlungspotentiale oder -zwänge der unterschiedlichen gesellschaftlichen Akteursgruppen. Zielvorgaben werden zumeist entweder naturwissenschaftlich-technisch begründet oder abstrakt moralisierend formuliert, aber in der Regel ohne Bezug zu den Handlungsmöglichkeiten und Interessenlagen sozialer Akteure und zu den gesellschaftlichen Umsetzungsbedingungen.«

⁹⁾ In den Ingenieurwissenschaften ist das anders. Sie erarbeiten und propagieren Vorschläge für *technisches Handeln*, zum Beispiel den Einsatz von Umwelttechnik. Allerdings ist durch diese Ausrichtung auf technisches Handeln die Antwort auf die Orientierungsfragen (1) und (2) nach dem Erkenntnisdefizit und dem Zweck der Resultate bereits vorgegeben.

Der Bedarf nach einem stärkeren externen Handlungsbezug ist somit neu gegenüber der Situation in den klassischen Naturwissenschaften. Wie die Forschungspraxis zeigt, sind in der naturwissenschaftlichen Umweltforschung bisher überwiegend solche Leitprinzipien etabliert, die von den klassischen Naturwissenschaften übernommen wurden und auf die Erfassung von Wirkungsmechanismen zielen. Die Umweltforschung hat bisher keine eigenständigen anerkannten Leitprinzipien, die darüber hinausgehen und Orientierungskraft für die spezifische Problematik der Umweltforschung haben. Zum Teil haben die Forschenden zwar diese Lücke für sich persönlich mit wissenschaftsexternen Motivationen gefüllt, jedoch ohne daß diese Motivationen oder Weltansichten wissenschaftsintern ausreichend spezifiziert und transparent gemacht wurden.

Ein zentraler Grund dafür, daß die klassischen Leitprinzipien zur Überwindung des Datendilemmas nicht ausreichen, ist die erhebliche *Unsicherheit* der Resultate wie auch der Prognosen über Handlungsfolgen und künftige Entwicklungen, die trotz aller Forschung weiter bestehen bleibt^[23, 24]. Die Unsicherheit kann mit neuen Erkenntnissen sogar zunehmen^[9c]. Entscheidungen und Handeln müssen immer unter Unsicherheit erfolgen, und daher muß der geforderte Handlungsbezug den Umgang mit Unsicherheit einschließen, das heißt, Konsequenzen aus der Unsicherheit sind nicht nur unmittelbar für das Handeln, sondern bereits *für die Forschungskonzepte* zu ziehen (siehe Problembereich 2 in Abschnitt 2.3).

Die gesuchten Leitbilder können beispielsweise aus einer Reflexion über die Stellung des Menschen in der Natur oder über Gerechtigkeitsprinzipien resultieren. Aus ihnen ergibt sich ein expliziter Umgang mit nichtintendierten, oftmals unvorhersehbaren Nebenfolgen von Umwelteingriffen und insbesondere mit der Frage, wie sich die Wissenschaftler als Akteure in einer Gesellschaft zu den eingetretenen oder prognostizierten Umweltveränderungen stellen: Wel-

che Umwelteingriffe lassen sich verantworten und welche nicht? Was sind die Voraussetzungen für Trendänderungen der Umweltbelastungen?¹⁰⁾

Die Hauptfrage besteht also darin, wie der erforderliche Handlungsbezug in den Umweltwissenschaften hergestellt werden kann¹¹⁾ (siehe Problembereich 3 in Abschnitt 2.3). Das Unsicherheits-Problem und das Nebenfolgen-Problem (das heißt die Gefahr, daß die Vielzahl der Nebenfolgen die intendierten Folgen konterkariert) stellen dabei eine besondere Herausforderung dar. Diese beiden Probleme sind neu gegenüber der Anfangszeit der Technisierung, in der bereits Francis Bacon vor 400 Jahren die Naturwissenschaft unmittelbar auf die Lösung externer Probleme verpflichtete^[15] – ein Ziel, welches die Ingenieurwissenschaften als Ideal auch heute noch verfolgen. In der Umweltforschung jedoch sind heute neue – und möglicherweise sehr andere – wissenschaftliche Forschungs- und Lösungskonzepte nötig.

2.3. Ansatzpunkte für ein neues Leitbild

Wir greifen hier die These von Beck auf, daß die Entwicklung von Lösungskompetenzen für Umweltprobleme es verlangt, die Spezialisierung in den Wissenschaften zu überwinden, hin zu einer integrativen, disziplinenübergreifenden Umweltforschung. Beck untersucht die Problemdynamik anhand des Konzepts der reflexiven Modernisierung (Exkurs 1) und liefert damit Hinweise für die Beantwortung der vier Orientierungsfragen^[17a]: »Entscheidend dafür, ob die Wissenschaft derart zur Selbstkontrolle ihrer praktischen Risiken beiträgt, ist dabei nicht, ob sie über ihren eigenen Einflußradius hinausgreift und sich um (politische) Mitsprache bei der Umsetzung ihrer Ergebnisse bemüht. Wesentlich ist vielmehr: *welche Art von Wissenschaft bereits im Hinblick auf die Absehbarkeit ihrer angeblich unabsehbaren Nebenfolgen betrieben wird*. Ausschlaggebend ist in diesem Zusammenhang: ob es bei der *Überspezialisierung* bleibt, die aus sich heraus Nebenfolgen produziert und damit deren "Unvermeidbarkeit" immer wieder zu bestätigen scheint, oder ob die Kraft zur *Spezialisierung auf den Zusammenhang* neu gefunden und entwickelt wird.«

Diese Überlegungen führen uns auf vier Problemereiche:

(1) Reflexivität

Becks Thesen zur "reflexiven Modernisierung" beziehungsweise zur "Risikogesellschaft", wonach die Wissenschaft

mit den Folgen der Umsetzung ihrer eigenen Forschungsergebnisse konfrontiert werde (Exkurs 1), lassen uns fragen: (a) Welche Ansatzpunkte liefert die These der "Reflexivität" für die Frage, wie die Umweltforschung ihre Art, Wissenschaft zu betreiben, in den letzten 30 Jahren verändert hat beziehungsweise zukünftig verändern kann?

(b) Welche konkreten Vorschläge liefert die Theorieskizze der "reflexiven Modernisierung" für Leitprinzipien, die helfen, das Orientierungsproblem zu lösen? Welche Defizite verbleiben?

(2) Umgang mit Ungewißheit in der Umweltforschung

Die von den Naturwissenschaften verlangte Sicherheit und Vollständigkeit des Wissens als rationale Handlungsgrundlage ist prinzipiell unerreichbar (vergleiche Referenzen^[15b, 24a]). Dies stellt die Umweltforschung vor eine neue Anforderung:

Gemäß dem bisherigen Erkenntnisideal waren Nichtwissen und Ungewißheit für die Wissenschaft eine Herausforderung im Sinne noch nicht erforschter Bereiche und daher nicht weiter problematisch. Für praktische Entscheidungen über Handlungsalternativen hingegen ist Nichtwissen ein Hemmnis, und oftmals muß trotz ungenügenden Wissens entschieden werden. Was sind praktische Konsequenzen für die Umweltforschung?

(3) Verhältnis von internen und externen Leitprinzipien in der Umweltforschung

Wir bezeichnen die in der Umweltwissenschaft erforderlichen Orientierungen mit Handlungsbezug (zum Beispiel Nachhaltigkeit und Vorsorgeprinzip) gegenüber den wissenschaftsinternen Leitprinzipien aus Abschnitt 2.2 im Anschluß an Schäfer^[15c] als wissenschaftsexterne Leitprinzipien. Es besteht die Gefahr, daß solche externen Leitprinzipien, die Antworten auf das Orientierungsproblem geben sollen, nur als eine Fassade vor den üblichen Forschungsbetrieb gestellt, aber nicht wirklich integriert werden:

Wie können externe Leitbilder (Nachhaltigkeit, "Unsicherheitsmanagement", ...) in der Umweltforschung stärker wirksam werden, und wie verträgt sich dies mit den intern vorhandenen Leitbildern?

(4) Verhältnis von Umweltwissenschaft und Politik

Zwischen Umweltwissenschaft und Politik besteht eine gegenseitige Abhängigkeit, aber beide verfolgen unterschiedliche Ziele^[20]. Die Umweltprobleme laufen nicht nur der Umweltwissenschaft, sondern auch der Politik davon (bezie-

¹⁰⁾ Dies umfaßt insbesondere die Frage nach den *strukturellen* beziehungsweise *institutionellen Voraussetzungen* dafür, daß umweltbewußte Akteure in einer Gesellschaft umweltschonendes Handeln überhaupt dauerhaft praktizieren können.

¹¹⁾ Erste Arbeiten mit umweltbezogenen handlungstheoretischen Ansätzen lassen sich beispielsweise in der sozialwissenschaftlichen "New Regional Geography" im angelsächsischen Sprachraum finden; diese verfolgen eine – auch bei Wehling [9d] propagierte – Anlehnung an Giddens [25].

ungsweise dem bisherigen Verbund von Wissenschaft und Politik):

Was muß sich am Verhältnis von Umweltwissenschaft und Politik ändern, wenn die Probleme effektiver gelöst werden sollen?

Im folgenden Abschnitt stellen wir als ein Fallbeispiel die Entwicklung der ökologischen Chemie in Deutschland vor; die allgemeine Diskussion der vier genannten Bereiche greifen wir in Teil II dieses Artikels wieder auf.

3. Fallbeispiel: Wechselnde Orientierungen in der ökologischen Chemie

Die ökologische Chemie oder Umweltchemie untersucht das Verhalten anthropogener Chemikalien in der Umwelt (siehe Exkurs 2). Dies umfaßt – rein naturwissenschaftlich gesehen – die Reaktivität und die Umwandlung der Stoffe bis hin zu ihrem Abbau (Bildung von Kohlendioxid, Wasser und Salzen); ihre Verteilung zwischen den Umweltkompartimenten Boden, Wasser, Luft, Vegetation etc.; ihren Transport in der Luft, in Meeresströmungen, Fließgewässern und Grundwasser sowie, im Übergang zur Toxikologie und Ökotoxikologie, ihre Wirkungen auf Organismen und Ökosysteme.

Wir teilen die Entwicklung der ökologischen Chemie während der letzten 40 Jahre in drei Phasen ein: eine *Initiierungsphase* von Anfang der sechziger Jahre bis Mitte der siebziger Jahre, eine *Verselbständigungsphase* bis Ende der achtziger Jahre und eine *Neuorientierungsphase* ab Anfang der neunziger Jahre. Diese drei Phasen dienen als ein heuristischer Rahmen dazu, Orientierungen an unterschiedlichen wissenschaftsinternen und wissenschaftsexternen Leitbildern deutlich zu machen.

3.1. Initiierungsphase

Die ökologische Chemie hat ihren Ausgangspunkt in der Zeit um 1960, als die Umweltbelastungen durch chlorierte Kohlenwasserstoffe wie DDT und durch Schwermetalle aus Kernwaffenversuchen wissenschaftlich erfaßt und öffentlich thematisiert wurden.¹²⁾ 1962 veröffentlichte Carson ihr Buch *Silent Spring*¹²⁶⁾, in dem sie die Auswirkungen des großflächigen Pestizideinsatzes in den USA in den fünfziger Jahren darstellt. *Silent Spring* löste eine heftige Kontroverse aus, die sich über Jahre hinzog und erheblich dazu beitrug, das

Exkurs 1

Reflexive Modernisierung

Reflexive Modernisierung ist eine Theorieskizze und ein Beobachtungskonzept für die Entwicklung moderner Industriegesellschaften. Eine zentrale These ist, daß der Modernisierungsprozeß sich selbst zum Thema und Problem wird. Reflexive Modernisierung ist gekennzeichnet durch *Selbstkonfrontation (Reflexivität)* sowie durch *Reflexion*:

- Die Industriegesellschaft wird mit den unvorhergesehenen, unerwünschten Nebenfolgen ihres Handelns konfrontiert ("Selbstgefährdungen").
- Reflexion bedeutet »kritische Rückfragen an ein "direkt" an seinen Zielen ausgerichtetes Denken und Handeln, das den Erfolg in der Durchsetzung seiner Absichten zum obersten Maß erhoben hat.«¹⁾

Die reflexive Modernisierung wirkt sich auch auf die Wissenschaft aus. Dies »beruht auf einer *Durchwissenschaftlichung*, die den wissenschaftlichen Zweifel auch auf die immanenten Grundlagen und externen Folgen der Wissenschaft selbst ausgedehnt hat.«^{2a)} Die wissenschaftliche Zivilisation verwissenschaftlicht "nicht mehr nur Natur, Mensch und Gesellschaft, sondern zunehmend sich selbst, ihre eigenen Produkte, Wirkungen, Fehler [...]. Es geht also nicht mehr um die "Befreiung aus vorgefundenen Abhängigkeiten", sondern um die Definition und Verteilung "selbstverschuldeter" Fehler und Risiken.«^{2b)} Damit verbunden ist eine Revision der umweltwissenschaftlichen Ziele und Leitvorstellungen hin zur Antizipation möglicher Nebenfolgen, zum Beispiel Institutionalisierung von Technikfolgenabschätzung, also nicht nur nachsorgende "Wiedergutmachungsforschung".

Gill hat die Auseinandersetzung moderner Gesellschaften mit Umweltrisiken als einen dreistufigen Prozeß ökologischer Modernisierung gelesen.³⁾ Auf jeder Stufe kommen neue Aspekte von Umweltauswirkungen in das Blickfeld: ausgehend von räumlichen und zeitlichen Nahfolgen, über die Bearbeitung von gut bekannten Fernfolgen bis hin zur Gegenwart mit der Kommunikation über und Bearbeitung von hypothetischen Risiken. Durch die gleichzeitige Auflösung des Fortschrittskonsenses in einen Dissens über die Frage, wie wir leben wollen, gerät die Offenheit des Entwicklungsprozesses in den Blick, aber damit auch die Notwendigkeit, ihn zu gestalten. Die Konsequenz von Beck und von Gill ist: Aufgrund der wechselseitigen Unsicherheit in Wissenschaft und Politik ist nach "aktiven Lernstrategien" zu suchen.

¹⁾ J. Mittelstraß: *Enzyklopädie der Philosophie und Wissenschaftstheorie*, Band 3, Metzler, Stuttgart (1995), p. 526.

²⁾ U. Beck: *Risikogesellschaft – Auf dem Weg in eine andere Moderne*, Suhrkamp, Frankfurt am Main (1986), insbesondere a) p 254; b) p. 259.

³⁾ B. Gill: "Reflexive Modernisierung und technisch-industriell erzeugte Umweltprobleme – Ein Rekonstruktionsversuch in präzisierender Absicht", *Zeitschrift für Soziologie* 28 (1999) 182–196.

Problemfeld "Umweltchemikalien" in der Öffentlichkeit zu thematisieren¹²⁷⁾. Ende der sechziger Jahre war das Problem sowohl in den USA wie in Europa gesellschaftlich und wissenschaftspolitisch so stark präsent, daß man mit breiteren und neu aufgelegten wissenschaftlichen Arbeitsprogrammen darauf reagieren konnte; ein Beispiel ist das Umweltprogramm der deutschen Bundesregierung von 1971¹²⁸⁾. Dies spiegelt sich auch in der Gründung neuer Institutionen wider, zum Beispiel der *Environmental Protection Agency* in den USA (1968)¹³⁾, des Instituts für ökologische Chemie an der GSF (damals Gesellschaft für Strahlenforschung, heute GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit) (1969) und des westdeutschen Umweltbundesamts (1974).

Die Initiierungsphase wurde geprägt durch die Reaktionen von Politik, Industrie und Wissenschaft auf ein unvorhergesehenes Problem. Im Unterschied zu anderen Forschungsthemen resultierte

es nicht aus der thematischen Entwicklungslogik der Naturwissenschaften, sondern Impulse von außen stimulierten die Forschung und richteten sie inhaltlich aus. Teilbereiche aus verschiedenen Wissenschaftsgebieten wie anorganischer, organischer und analytischer Chemie, Erdwissenschaften, Hydrologie und andere mehr wurden zur ökologischen Chemie (oder Umweltchemie) zusammengeführt, und neue, umweltchemische

¹²⁾ Selbstverständlich wurde umweltchemische und generell umweltorientierte naturwissenschaftliche Forschung auch schon vorher durchgeführt [7a]. Ein neuer Aspekt in den 1960er Jahren war jedoch, daß die Anzahl und Menge der in die Umwelt freigesetzten Chemikalien seit dem zweiten Weltkrieg stark angestiegen war und daß das Problem der Umweltchemikalien dadurch eine neue Dimension angenommen hatte, was schließlich auch zu neuem Forschungsbedarf führte.

¹³⁾ Die Gründung der US-amerikanischen EPA geht direkt auf die Debatte zurück, die Carsons Buch angestoßen hatte [27].

Zeitschriften wie *Environmental Science and Technology* (American Chemical Society, ab 1967) und *Chemosphere* (ab 1974) wurden gegründet. 1972 wurde der Lehrstuhl für ökologische Chemie an der Technischen Universität Freising-Weihenstephan eingerichtet.

Für die ökologische Chemie waren von Beginn an zwei Orientierungen relevant: einerseits die Orientierung, sich am gesellschaftlichen Problemlösungsprozeß zur Frage der Umweltchemikalien zu beteiligen, andererseits die Orientierung an etablierten, internen Leitprinzipien der beteiligten Disziplinen. Am externen Bedarf ausgerichtet war ein Satz relativ einfach formulierter Beurteilungskriterien für Umweltchemikalien wie Produktionsmenge, Persistenz, globale Verteilungstendenz, Umwandlungsverhalten in der Umwelt und biologische Wirkungen^[29]; außerdem wurde betont, daß man sich angesichts der Uferlosigkeit möglicher Prozesse und toxischer Wirkungen auf wesentliche Problem-Aspekte beschränken müsse^[29, 30].

Zu den traditionellen naturwissenschaftlichen Leitprinzipien hingegen zählt das Ziel, die Mechanismen der Umwandlungs- und Verteilungsprozesse in der Umwelt sowie der toxischen Wirkungen als *Kausalzusammenhänge* zu erfassen, so daß das Geschehen in der Umwelt aus der Kenntnis der Stoffeigenschaften und der Umweltbedingungen rekonstruiert und auch prognostiziert werden kann. Zusätzlich kommt der Anspruch hinzu, das Stoffverhalten in der Umwelt möglichst vollständig zu verstehen und zu erfassen.

Weiterhin läßt sich wissenschaftsintern zwischen verschiedenen *disziplinären* Ausrichtungen unterscheiden. Wichtig sind hier die chemische, die toxikologische und die biologisch-systemwissenschaftliche Ausrichtung. Die *chemische* Orientierung, das heißt die Zielsetzung, Umwandlungsverhalten und Verteilung der Stoffe in der Umwelt zu verstehen, prägte sich zum Beispiel in den Arbeiten von Korte^[29, 31, 32], Ballschmiter^[33–35], Stumm^[36] und Junge^[37] aus.^[14]

Auf *toxikologischer* Seite wurde die Umwelttoxikologie (siehe Exkurs 2) ins Leben gerufen, die von der etablierten Humantoxikologie ausging und sich auf den Tierversuch am Einzelorganismus stützte^[30]. Hier stand man vor dem Problem, daß Wirkungen in der Umwelt

deutlich vielschichtiger und langfristiger sind als in den bisherigen Untersuchungsgebieten der Toxikologie. In der Umwelt

wirken eine Vielzahl von Stoffen gleichzeitig, in wechselnden Konzentrationen und Zusammensetzungen und über län-

Exkurs 2

Chemie, Ökologische Chemie, Umweltchemie und Ökotoxikologie

Zielsetzungen der *Chemie* im weiteren Sinne sind die Aufklärung von Zusammensetzung und Eigenschaften von Stoffen sowie die Trennung und die Umwandlung, insbesondere auch die zielgerichtete Synthese von Stoffen. Hauptgebiete der Chemie sind historisch die analytische, anorganische, organische und physikalische Chemie, hinzu kommen die technische Chemie (im Übergang zum Chemieingenieurwesen) sowie zahlreiche, oft noch junge Zwischengebiete.¹⁾ Einerseits wird die Entwicklung in den einzelnen Gebieten der Chemie durch vielfältige Querbeziehungen zu anderen Disziplinen sowie durch Anwendungsfragen außerhalb der Chemie stimuliert. Andererseits folgen viele Zielsetzungen der Forschung aber auch den internen Entwicklungslinien der Teilgebiete, die sich oftmals über längere Zeit etabliert haben. Für den Fortgang der Forschung und die Erarbeitung verlässlicher Resultate nach etablierten Standards ist dies eine wichtige Voraussetzung. Andererseits bedeutet das "Beharrungsvermögen" der disziplinären Forschung aber auch, daß gewisse außerwissenschaftliche Fragen nicht oder nur in geringem Umfang aufgenommen werden. Speziell im Bereich der Umweltforschung ist dies ein Hindernis, welches uns dazu führt, nach der Orientierung der Forschung und nach dem Umgang mit den vier Orientierungsfragen aus Abschnitt 1 zu fragen.

Gegenstand der *Umweltchemie* sind Verteilung, Umwandlung und Abbau anthropogener Chemikalien in der Umwelt. Dies umfaßt unter anderem die analytische Erfassung der Stoffe in allen Gegenden der Erde, das Verständnis ihrer Reaktivität unter einer Vielzahl unterschiedlicher Umweltbedingungen (beeinflusst durch Temperatur, Feuchtigkeit, Bodenbeschaffenheit und vieles anderes mehr) sowie ihrer Zirkulation zwischen den Umweltmedien (Meerwasser, Flüsse und Seen, Luft, Sedimente, verschiedene Bodentypen, Vegetation, Aerosolpartikel und anderes mehr), weiterhin die Identifikation und Charakterisierung ihrer Umwandlungsprodukte und das Verständnis von Aufnahmewegen in die Organismen sowie der Bioakkumulation. Neben Untersuchungen im Feld werden dazu Laborexperimente und Computermodellierungen durchgeführt, in denen die Umweltbedingungen vereinfacht und besser kontrollierbar gemacht werden.

Die Bezeichnung *Ökologische Chemie* ist weitgehend synonym zur Umweltchemie; sie betont, daß die Stoffe, nachdem sie aus der Technosphäre und damit aus dem Bereich menschlicher Kontrolle ausgetreten sind, in Ökosystemen zirkulieren, dort vielfältigen Interaktionen unterliegen und Wirkungen auslösen.^{2a)}

Neben der Umweltchemie hat sich in den letzten Jahren das Feld der *Green Chemistry* (auf deutsch oft: *Nachhaltige Chemie*) entwickelt.^{3, 4)} Dort geht es um die Optimierung chemischer Produkte und Prozesse dahingehend, daß weniger Ressourcen verbraucht werden, weniger Abfälle entstehen und die Umweltbelastungen durch die Produkte vermindert werden. Es handelt sich hierbei also um ein umfassenderes Konzept, welches neben der Umweltchemie, die das Verhalten der Produkte in der Umwelt untersucht, auch die Synthesewege und die Prozeßführung einbezieht.

Aufgabe der *Ökotoxikologie* ist nach Korte »die Erfassung der Wirkung von Chemikalien auf Arten, Lebensgemeinschaften, auf die abiotischen Ausschnitte von Ökosystemen und deren Funktionen. Sie unterscheidet sich prinzipiell von der Toxikologie dadurch, daß nicht die Schädigung von Individuen betrachtet wird.«^{2b)}

Dementsprechend sollte die Untersuchung der toxischen Wirkung von Stoffen auf eine Stichprobe von Individuen *einzelner* umweltrelevanter Spezies als *Umwelttoxikologie* bezeichnet werden.⁵⁾ Als – etwas irreführender – Sprachgebrauch hat sich jedoch auch für diesen Bereich der Einzelspezies-Tests der Begriff "Ökotoxikologie" eingebürgert. Zur Methodik des dabei oft verwendeten Tests auf die letale Dosis oder Konzentration für 50 Prozent der untersuchten Organismen (LD₅₀, LC₅₀) vergleiche⁶⁾.

¹⁾ Römpp: *Chemielexikon*, Thieme, Stuttgart (10/1996).

²⁾ F. Korte, M. Bahadir, W. Klein, J. P. Lay, H. Parlar, I. Scheunert: *Lehrbuch der Ökologischen Chemie*, Thieme, Stuttgart (3/1992), insbesondere a) p. 1; b) p. 2.

³⁾ P.T. Anastas, J.C. Warner: *Green Chemistry – Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford (1998).

⁴⁾ C. Christ: *Production-Integrated Environmental Protection and Waste Management in the Chemical Industry*, Wiley-VCH, Weinheim (1999).

⁵⁾ J. Cairns, J.R. Pratt: "Trends in ecotoxicology", *The Science of the Total Environment*, Supplement (1993) 7–22.

⁶⁾ G. Zbinden, M. Flury-Roversi: "Significance of the LC₅₀-Test for the toxicological evaluation of chemical substances", *Archives of Toxicology* 47 (1981) 77–99.

¹⁴⁾ Diese Zitate sind exemplarisch und geben keinen vollständigen Überblick über die Arbeiten der genannten Wissenschaftler, sondern illustrieren die thematische Ausrichtung in der Initiierungsphase.

gere Zeiten auf eine Vielzahl von Organismen ein, wobei nicht nur Individuen, sondern auch Populationen und Ökosysteme betroffen sind. Von chemischer Seite wurden die Möglichkeiten, dieses komplexe Wirkungsgefüge zu durchdringen, eher skeptisch beurteilt^[29, 38], und zugleich wurde die Aussagekraft angezweifelt, die Ergebnisse, welche an individuellen Organismen ausgewählter Spezies gewonnen wurden, für Populationen und Ökosysteme haben.

Diese wissenschaftsinternen Orientierungen (Erkenntnisziele und Methoden der verschiedenen naturwissenschaftlichen Disziplinen) und die wissenschaftsexterne Orientierung (praktische Lösung des Problems "Umweltchemikalien", Entwicklung einer Gesetzgebung etc.) waren nicht aufeinander abgestimmt. Man hat die wissenschaftliche Untersuchung und die politische Bewertung und Entscheidungsfindung im Gegenteil sogar explizit als getrennte Schritte angesehen: »Der Wissenschaftler entwickelt darin [in wissenschaftlichen Expertisen, die Autoren] die wissenschaftlich vertretbaren Möglichkeiten zur Abwendung einer Gesundheitsgefährdung. Seine Beratung muß sich aber auf die Feststellung rein wissenschaftlicher Sachverhalte beschränken. Die Abwägung der mit restriktiven Maßnahmen verbundenen ökonomischen Möglichkeiten und Belastungen ist allein Sache des Politikers. Sie darf das Urteil des Wissenschaftlers nicht beeinflussen. Ändert der Wissenschaftler seine Meinung durch eine Rückkoppelung ökonomischer Betrachtungen auf den wissenschaftlichen Entscheidungsprozeß, sind erfahrungsgemäß Gesetzgeber und Presse rasch mit dem Vorwurf der Unglaubwürdigkeit bei der Hand – mit Recht!«^[30a] Eine mögliche Diskrepanz zwischen dem wissenschaftlichen Erkenntnisprozeß und dem umweltpolitischen Bedarf hat man in dieser Phase noch nicht als Problem beurteilt.

Die Initiierungsphase brachte in vielen Bereichen einen schnellen Erkenntnisfortschritt, Beispiele sind die Stratosphärenchemie einschließlich Ozonabbau^[39], die Transportprozesse von Pestiziden auf globalem Maßstab^[40] oder die Zirkulation von Spurengasen in der Atmosphäre^[41].

Auch außerwissenschaftlich wurde ein Markstein erreicht mit der Diskussion, die das Buch *Die Grenzen des Wachstums*^[42], initiiert vom *Club of Rome*, ausgelöst hatte. Das Buch brachte das aus der Kybernetik gespeiste Systemdenken (Regelkreise mit positiven und negativen Rückkoppelungen etc.) in die

Debatte ein. Zudem machte es deutlich, daß sich die Probleme, die aus der Dynamik gekoppelter Wachstumsprozesse resultieren, nicht durch technische Maßnahmen allein würden lösen lassen, sondern große technische, wissenschaftliche, aber ebenso politische und kulturelle Anstrengungen erfordern würden.¹⁵⁾ Dadurch wurde auch in einer breiteren Öffentlichkeit bekannt, daß die Umwelteingriffe, die mit der technisch-industriellen Lebensweise verbunden sind, weiträumige und gravierende Folgen auslösen, und daß diese Folgen durch die lange Zeit als unbegrenzt empfundene Umwelt eben nicht aufgefangen werden. Diese Konfrontation mit den ökologischen Folgen trug zur Auflösung des bis dahin gültigen Fortschrittskonsenses bei.

3.2. Verselbständigungsphase

In dieser zweiten Phase (beginnend Mitte der siebziger Jahre) hat sich das Untersuchungsgebiet der ökologischen Chemie stark verbreitert. Parallel dazu wurde das methodische Instrumentarium erheblich weiterentwickelt, zum Beispiel die chemische Analytik und die computergestützte Modellierung, so daß immer leistungsfähigere Meß- und Berechnungstechniken zur Verfügung standen. Das Konzept der aquatischen Chemie, das von Stumm und Morgan (1970) vorgestellt worden war^[36], wurde in dieser Phase weiter ausgebaut; man verglich dazu die erweiterten und überarbeiteten Versionen^[36, 43] des ursprünglichen Lehrbuchs von 1970. Ein anderes Beispiel ist das zunehmend differenziertere und breitere Instrumentarium von Modellen, die die Verteilung und den Abbau von Stoffen berechnen^[44-46].

Anders als in der Initiierungsphase richtete sich das Erkenntnisinteresse mehr auf wissenschaftsinterne Fragen der Methodenentwicklung und des systematischen Verständnisses der Umweltsysteme. Gleichzeitig internationalisierte sich die Forschung stark; weitere Fachzeitschriften (*Ecotoxicology and Environmental Safety* 1977, *Climatic Change* 1977, *Environmental Toxicology and Chemistry* 1982) und wissenschaftliche Gesellschaften wie die *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) wurden gegründet.

Diese Entwicklung führte auch zur Einrichtung von Studiengängen wie der Geoökologie in Bayreuth ab 1979 (Überblick bei Lenoir^[47]) und zum Erscheinen erster Lehrbücher und Monographien (*Ökologische Chemie*^[48], *Handbook of Environmental Chemistry*^[49]).

Die gesetzlich vorgeschriebene Stoffbewertung^[50] wurde auf die beiden Komponenten *Exposition* (Verteilung, Umwandlung und Abbau der Stoffe) und *Wirkung* (Aufnahme, Metabolisierung, toxische Effekte) gestützt. Die Wirkungsanalyse war zunächst – und ist dies oftmals auch heute noch – auf die "Individual-Toxikologie" ausgewählter Spezies (vor allem in aquatischen Systemen: Algen, Daphnien, Fische) beschränkt. Zusätzlich wurden nun auch ganze Ökosysteme als betroffene Entitäten angesehen, und die eigentliche Ökotoxikologie wurde vor dem Hintergrund der bereits bestehenden Ökosystemforschung als Forschungsgebiet etabliert.¹⁶⁾ Bei diesem Ansatz, die Reaktionen von Ökosystemen auf chemischen Streß erfassen zu wollen, besteht jedoch das Problem, daß viele Systeme – im Gegensatz zu Laborsystemen oder technischen Systemen – eine so hohe Komplexität haben, daß die Mechanismen der Prozesse unklar bleiben und Verallgemeinerungen schwierig sind^[51]. Damit trat das in der Ökosystemforschung bereits bekannte "Komplexitätsproblem" auch in der ökologischen Chemie stärker in den Vordergrund^[52]: Die Vielzahl von Beziehungen und Prozessen in Ökosystemen erschwert es, Schlüsselprozesse und ausschlaggebende Mechanismen zu identifizieren (bekannte Beispiele sind Waldsterben und Klimawandel). Dieses Problem steht im Konflikt mit dem wissenschaftsinternen Anspruch, Erkenntnis möglichst vollständig zu gewinnen. Der erhebliche Anteil an Nichtwissen führt bei politischen Entscheidungsprozessen zu entsprechender, nicht zu behobender Unsicherheit, was die Kluft zwischen Wissenschaft und Politik weiter vergrößert. Nichtwissen ist in der Wissenschaft ein Stimulans zu weiterer

¹⁵⁾ Speziell zur Frage der Chemikalienbelastung heißt es bei Meadows et al. [42a]: »Der Nutzen von umweltverschmutzenden Tätigkeiten ist sowohl zeitlich wie räumlich weit getrennt von den Folgen, die den Preis des Nutzens darstellen. (...) Wer leidet am Stromunterlauf unter dem Dreck, der in den Oberlauf fließt?« Hier werden keine chemischen oder toxikologischen Aspekte des Problems angesprochen, sondern die handlungsbezogenen Fragen nach der Verteilung von Nutzen und Nebenfolgen.

¹⁶⁾ 1983 wurde das Fraunhofer-Institut für Umweltchemie und Ökotoxikologie in Schmallenberg eingerichtet; in den achtziger Jahren wurden unter anderem durch Arbeitsgruppen der OECD Prüfverfahren für Expositions- und Wirkungseigenschaften von Chemikalien entwickelt, die für die nationalen und internationalen Stoffbewertungsprogramme benötigt wurden.

Forschung, in der Politik jedoch ein Hemmnis für den Entscheidungsprozeß.

Auf rechtlicher und behördlicher Seite wurden in dieser zweiten Phase die nationale und die europäische Chemikaliengesetzgebung aufgebaut^[53]. Wie sich heute zeigt, beruht diese Gesetzgebung jedoch teilweise auf nicht haltbaren Annahmen der Art, daß die Folgen von Chemikalienemissionen erkennbar und zurechenbar sind und daß Exposition und Wirkungen für alle relevanten Stoffe verlässlich bestimmt werden können. Die Gesetzgebung muß daher überdacht werden, wie seit einigen Jahren zunehmend artikuliert wird^[2, 54, 55].

Einerseits ist der Ausdifferenzierungsprozeß, der in der Verselbständigungsphase begann und sich noch immer fortsetzt, charakteristisch und wohl auch notwendig für die Etablierung und Profilierung eines neuen wissenschaftlichen Gebietes. Andererseits hat die Ausdifferenzierung und Vielfältigung der wissenschaftsinternen Fragestellungen sowie die Konzentration auf die Methodenentwicklung die Orientierung am ursprünglichen, wissenschaftsexternen Problem erheblich vermindert. Forschungsfragen ergaben sich oftmals nicht mehr aus dem eigentlichen Problem, sondern aus der Eigendynamik der wissenschaftlichen Entwicklung.^[17]

Neben der Verbreiterung und Ausdifferenzierung der umweltchemischen Forschung haben als ein dünnerer Strang die problemorientierten Leitbilder aus der Initiierungsphase fortbestanden. Ballschmitter spricht in kurzen Stellungnahmen in den *Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium* (der Zeitschrift der Gesellschaft Deutscher Chemiker) von der Allgegenwart anthropogener Chemikalien und betont, daß die "Verarbeitungskapazität", welche die Umwelt für Chemikalien hat, ausgela-

¹⁷⁾ So zum Beispiel bei einer Arbeit über das UV-Absorptionsspektrum möglicher FCKW-Ersatzstoffe, welches Aufschluß darüber gibt, ob diese Substanzen zum stratosphärischen Ozonabbau beitragen können [56]. Die Autoren weisen dort selbst auf die geringe praktische Relevanz ihrer Resultate hin: »Nevertheless, no major implication of the temperature dependence of the absorption cross-sections of these compounds on the stratospheric photochemistry is expected because of the relatively short chemical lifetime of these species in the atmosphere.« Das heißt, die Substanzen gelangen gar nicht in die Stratosphäre, wo der Abbau durch UV-Licht relevant würde, was den Autoren bereits vor Beginn ihrer Arbeit bekannt war.

¹⁸⁾ Forschung, die ihre Zielsetzung aus interner Entwicklung einzelner Teilgebiete wie der organischen oder physikalischen Chemie oder aber aus Anwendungsfragestellungen (zum Beispiel in der Pharmaforschung) bezieht.

stet sei^[35, 57]. Damit werden neue Leitideen angedeutet, die die umweltchemische Forschung von der "klassischen"^[18] chemischen Forschung absetzen könnten. Formulierungen wie »Für Ozeane kann man keine Klärwerke bauen«^[35] unterstreichen einen Aspekt der globalen Chemikalienbelastung, der aus rein naturwissenschaftlicher Sicht nicht besonders relevant wäre: Abbauprozesse oder Toxizitätsmechanismen werden durch die Endlichkeit der Erde nicht beeinflusst. Für das praktische Problem – welche Stoffe sollen in welchen Mengen in die Umwelt entlassen werden dürfen? – ist die Begrenztheit aller Umweltmedien jedoch eine wesentliche Randbedingung.

1977 unterstreicht Stephenson in der neu gegründeten Fachzeitschrift *Ecotoxicology and Environmental Safety* die Bedeutung der Persistenz von Chemikalien als Bewertungskriterium^[58]. Die Persistenz ist ein aggregierter Parameter, der die Abbaubarkeit beziehungsweise die "Anwesenheitsdauer" und damit das Gefährdungspotential eines Stoffs in der Umwelt charakterisiert. Sie ermöglicht eine Komplexitätsreduktion und ist aus diesen Gründen ein wichtiger Indikator für die Stoffbewertung und zudem im Hinblick auf externe Leitbilder relevant. Auch Klöpffer^[59] führt Argumente für die Persistenz als zentrales Bewertungskriterium an, und Schmidt-Bleek und Hamann^[60] schlagen eine vereinfachte und präventive Stoffbewertung anhand des Expositionsverhaltens (Emissionsmenge, Persistenz, Mobilität) vor. Eine Reihe von Autoren erarbeitet im Hinblick auf die neu entstehende Chemikaliengesetzgebung standardisierte Bewertungsverfahren, die sich am wissenschaftsexternen Bedarf orientieren^[61–64]. Schmidt-Bleek et al.^[64] betonen die Herausforderung, die dieser Bedarf sowohl für die Behörden wie auch für die Wissenschaft darstellt.

In der Wissenschaft jedoch bleibt in den achtziger Jahren die Resonanz auf solche wissenschaftlichen Konzepte mit wissenschaftsexternem Ursprung gering^[65].

3.3. Neuorientierungsphase

In der Neuorientierungsphase etwa ab 1990 beziehen sich verschiedene Wissenschaftler wieder verstärkt auf wissenschaftsexterne Leitbilder. Ein zentrales externes Leitbild, das nun wirksam wird, ist "Nachhaltigkeit". Der Begriff "Nachhaltigkeit" beziehungsweise "Sustainability" ist seit dem Brundtland-Bericht *Our Common Future* von 1987^[66]

in der Diskussion und wurde als Leitbild international relevant spätestens durch die UNCED-Konferenz von Rio de Janeiro 1992. Zusätzlich verstärkte der Brandunfall von Schweizerhalle (1986) als äußerer Anlaß in der Chemie die Diskussion über Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit.

Ein weiteres wichtiges wissenschaftsexternes Leitbild ist das Vorsorgeprinzip, das in der Konvention zum Schutz der Nordsee im Jahr 1987 als umweltpolitisches Prinzip formuliert wurde^[67]. Mit explizitem Bezug auf das Vorsorgeprinzip hat Schweden innerhalb der EU einen Vorstoß unternommen, die Stoffbewertung nicht mehr vorrangig auf Toxizitätsnachweise zu stützen, sondern Persistenz und Bioakkumulation als präventiv ausgerichtete Hauptkriterien zu verwenden^[68].

Wesentlich ist bei solchen wissenschaftsexternen Leitbildern, daß sie sich auf Handlungen – nämlich Umwelteingriffe – und ihre Folgen beziehen. Die Leitbilder enthalten zwar noch keine konkreten Kriterien zur Beurteilung und künftigen Gestaltung von Umwelteingriffen, aber sie bilden eine normative Grundlage und zielen auf die Entwicklung und Ausformulierung solcher Kriterien. In der Neuorientierungsphase wird verstärkt ein Bezug zwischen solchen handlungsbezogenen Leitbildern und naturwissenschaftlicher Forschung gesucht. Zum Teil wird dabei auch explizit an die ursprünglichen Kriterien zur Stoffbewertung aus der Initiierungsphase angeknüpft, vor allem an die Persistenz.

Die Bezeichnung "Neuorientierungsphase" bezieht sich allerdings nicht auf den Hauptteil der ökologischen Chemie; dieser ist bis in die Gegenwart von den Entwicklungen aus der Verselbständigungsphase geprägt: Ausdifferenzierung, Verbreiterung, methodische Weiterentwicklung (der Umfang der Zeitschrift *Environmental Science & Technology* hat sich von 1989 bis 1999 vervierfacht), Einrichtung neuer Studiengänge, Publikation weiterer Lehrbücher zur Umweltchemie^[69–71].

Im folgenden nennen wir – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – einige Beispiele für die Orientierung an wissenschaftsexternen Leitbildern:

- Held stellt die Frage nach der Stoff- und Technologiebewertung in den Mittelpunkt seiner Arbeiten zur Chemiepolitik. Verschiedene Akteure aus Industrie, Behörden und Forschung kommen zu Wort und diskutieren über Bewertungskriterien, weniger über wissenschaftliche Resultate als solche^[72, 73].

● Es gibt Ansätze dafür, in der Chemie-Ausbildung Bezug auf Leitbilder wie Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung etc. zu nehmen. Kating und Fischer stellen dar, wie sich Abfallvermeidung und Stoffrückgewinnung im chemischen Praktikum ohne Abstriche am sonstigen Lernstoff erreichen lassen^[74].

● Altlastenstandorte und die Entsorgung chemischer Abfälle sind ein erhebliches praktisches Problem. Vor diesem Hintergrund wird die *Abbauchemie* in Ergänzung zur bis dahin zentralen *Synthesechemie* als eine Kategorie genannt, für die ebenfalls chemisches Wissen erarbeitet werden muß^[75].

● Scheringer, Berg und Müller-Herold knüpfen an das ursprüngliche Bewertungskriterium der Persistenz an und ergänzen es durch die räumliche Reichweite, die ein zur Persistenz (Zeitdauer der Chemikalienbelastung) analoges Kriterium für den Raum bildet^[76, 77]. Bei diesem Ansatz, der als das *Gefährdungskonzept* bezeichnet wird^[23, 24], wird explizit ein Bezug zwischen naturwissenschaftlichen Resultaten und normativen Kriterien wie dem Verursacherprinzip, dem Vorsorgeprinzip und Gerechtigkeitsprinzipien hergestellt. Das "Wertfreiheitspostulat" wird kritisch überdacht, und ein transparenter Bezug zwischen naturwissenschaftlicher Forschung und den wissenschaftsexternen Bewertungs- und Entscheidungsfragen wird gesucht^[78]. In den naturwissenschaftlichen Arbeiten zu diesem Ansatz wird untersucht, wie die Kriterien Persistenz und Reichweite konkret formuliert und quantitativ bestimmt werden können^[79-83].

● Von Gleich entwickelt das Konzept der *Eingriffstiefe* als Bewertungskriterium für Technologien. Dabei nimmt er explizit auf das Vorsorgeprinzip als Leitbild Bezug und diskutiert den Umgang mit Nichtwissen sowie die Entwicklung von Kriterien zur Stoff- und Technikbewertung^[65, 84]. Mit solchen breiter abgestützten Kriterien, die auf den "Charakter" von Technologien bezogen und auch normativ fundiert sind, geht er für die Stoffbewertung über das Konzept von Expositions- und Wirkungsanalyse hinaus. Man vergleiche hierzu auch *Plädoyer für eine Sanfte Chemie* von Fischer^[85] sowie die Studie *Hochst Nachhaltig*^[86].

● In der Ökobilanzierung wurde das Verhältnis zwischen Inventarisierung

(Sachbilanz) und Bewertung der Umweltauswirkungen (Wirkungsbilanz) seit Anfang der neunziger Jahre kontrovers diskutiert. Der Status der einfließenden Werturteile wurde dabei zunehmend präzisiert; mittlerweile wird der Einfluß, den die Wirkungsbilanz und die damit verbundenen Bewertungen auch auf die Sachbilanz haben, allgemein anerkannt^[87].

Diesen Beispielen ist gemeinsam, daß wissenschaftsexterne Probleme eine neue Ausrichtung der naturwissenschaftlichen Fragestellungen und Vorgehensweisen bewirken. Neben der Orientierung an umweltpolitischen Leitbildern und Problemstellungen ist allerdings seit Ende der neunziger Jahre auch eine Rückwendung der naturwissenschaftlichen Umweltforschung zu wissenschaftsinternen Leitbildern und eine Verlagerung der Forschung weg von der Umweltproblematik zu beobachten^{[10, 11], 19)}.

4. Erste Zusammenfassung und Ausblick

Der Abriß der Entwicklung der ökologischen Chemie zeigt den wechselnden Einfluß interner und externer Orientierungen auf die Forschung. Seit dem Ende der achtziger Jahre gibt es mit dem Vorsorgeprinzip und der nachhaltigen Entwicklung starke umweltpolitische Leitbilder, die in der Forschung jedoch erst ansatzweise explizit aufgegriffen werden. Die Autonomie der Forschung ist ambivalent, da sie einerseits Unabhängigkeit ermöglicht, andererseits aber auch dazu führt, daß die Forschungsfragen sich von den wissenschaftsexternen Problemen abkoppeln. Die Abstimmung zwischen wissenschaftsinternen Leitprinzipien und umweltpolitischen Leitbildern ist somit schwierig.

Ähnliche Beobachtungen lassen sich zum Beispiel in der Klimaforschung machen. Dort ist ebenfalls ein wechselnder Einfluß unterschiedlicher Orientierungen auf die Forschungsfragen zu beobachten^[88, 89]. Unsere These von der problematischen Abstimmung zwischen internen und externen Orientierungen ließe sich somit an weiteren Beispielen belegen.

Die weitere Entwicklung einer Umweltforschung, die auf wissenschaftsexterne Probleme orientiert ist und einen stärkeren Handlungsbezug aufweist, ist nach wie vor offen. Die Möglichkeiten für eine solche Forschung werden einerseits vom wissenschaftsexternen Bedarf in Politik und Industrie bestimmt und von den Chancen, gemeinsam überzeu-

gende Ansätze zur Problembewältigung zu entwickeln. Andererseits ist für die künftige Entwicklung wesentlich, ob eine problemorientierte und handlungsbezogene Umweltforschung im Forschungssystem weiter Fuß fassen kann. Auch eine solche Forschung muß in einigen wichtigen Punkten dem Leitbild der klassischen Naturwissenschaft genügen; vor allem müssen ihre Resultate in technischer und methodischer Hinsicht den wissenschaftsinternen Qualitätsstandards genügen. Damit ist jedoch noch nicht festgelegt, worin der Zweck der Resultate gesehen wird und wie der Forschungsgegenstand und die Methode gewählt werden, d.h. wie die Orientierungsfragen aus Abschnitt 1 beantwortet werden. Hier bietet die Orientierung an externen Leitbildern die Möglichkeit, neue Sichtweisen und einen Bezug auf externe Probleme sowie auf normative Fragen einzubringen.

Ansatzpunkte für ein solches Vorgehen untersuchen wir im Folgeartikel zum vorliegenden Beitrag (Teil II, Zum Leitbild "Reflexive Umweltforschung"^[19]). Wir greifen dort die vier Problembereiche aus Abschnitt 2.3 wieder auf und werten das Beispiel der ökologischen Chemie im Hinblick auf die in Abschnitt 2.3 gestellten Fragen aus: Möglichkeiten und Grenzen einer "reflexiven Wissenschaft", Umgang mit Nichtwissen und Unsicherheit, Verbindung wissenschaftsinterner und wissenschaftsexterner Leitbilder sowie das Verhältnis zwischen Umweltforschung und Politik. Insbesondere stellen wir das Leitbild der "reflexiven Umweltforschung" zur Diskussion, das eine Möglichkeit bieten soll, zwischen wissenschaftsinternen und wissenschaftsexternen Leitvorstellungen – die *beide* für die Umweltforschung von grundlegender Bedeutung sind – zu vermitteln.

Literaturverzeichnis

- [1] G. Klaus: "Dem Fischrückgang auf der Spur – Belastung der Bewässer verursacht Gesundheitsstörungen", *NEUE ZÜRCHER ZEITUNG* (31. Mai 2000) 73; siehe auch www.nzz.ch.
- [2] EEA: "Chemicals in the European Environment: Low Doses, High Stakes?", *The European Environment Agency and UNEP Annual Message 2 on the State of Europe's Environment*, Kopenhagen (1998) 32.
- [3] H. Behret, J. Koppenhöfer: *Assessment of Existing Chemicals – A Contribution towards Improving Chemical Safety*, GDCh/BUA, Frankfurt am Main (1999).
- [4] EEA: "Environment in the European Union at the Turn of the Century", *Environmental Assessment Report No. 2*, Kopenhagen (1999) 113, 125.

¹⁹⁾ Ein besonders augenfälliges Beispiel für diese Entwicklung ist, daß kürzlich beschlossen wurde, das Institut für ökologische Chemie an der GSF zu schließen (persönliche Mitteilung D. Lenoir).

- [5] P.T. Anastas, J.C. Warner: *Green Chemistry – Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford (1998).
- [6] C. Christ: *Production-Integrated Environmental Protection and Waste Management in the Chemical Industry*, Wiley-VCH, Weinheim (1999).
- [7] S. Böschen: *Risikogenese – Prozesse gesellschaftlicher Gefahrenwahrnehmung: FCKW, DDT, Dioxin und Ökologische Chemie*, Leske und Budrich, Opladen (2000), p. 281f; a) p. 267ff.
- [8] W. Lass, F. Reusswig: "Worte statt Taten?", *Politische Ökologie* 63/64 (2000) 11–14.
- [9] P. Wehling: "Sustainable Development – eine Provokation für die Soziologie?", in K.W. Brand (Ed.): *Nachhaltige Entwicklung – Eine Herausforderung an die Soziologie*, Leske und Budrich, Opladen (1997), p. 35–50; a) p. 44–50; b) p. 48; c) p. 46; d) p. 49.
- [10] H. Frank: "Umweltchemie und Ökotoxikologie, wo stehen Forschung und Lehre?", *Mitteilungsblatt der Fachgruppe Umweltchemie und Ökotoxikologie der Gesellschaft Deutscher Chemiker* 3 (2000) 3–5.
- [11] H.R. Thierstein: "Unsichere Nachhaltigkeit – nachhaltige Unsicherheit?", *ProClim Flash* 18 (2000) 1–3.
- [12] M. Burke: "Assessing the environmental health of Europe", *Environmental Science and Technology* 34 (2000) 76A–80A, p. 77A; a) p. 78A; b) p. 79A.
- [13] J. Lattmann, A. Welge: "Umweltpolitik aus Sicht der Städte – Anforderungen und Rahmenbedingungen", *Zeitschrift für angewandte Umweltforschung* 13 (2000) 27–30.
- [14] G. Bechmann, N. Stehr: "Risikokommunikation und die Risiken der Kommunikation wissenschaftlichen Wissens", *GAIA* 9/2 (2000) 113–121.
- [15] L. Schäfer: *Das Bacon-Projekt – Von der Erkenntnis, Nutzung und Schonung der Natur*, Suhrkamp, Frankfurt am Main (1993), p. 67; a) p. 30; b) p. 31; c) p. 67ff.
- [16] N. Luhmann: *Ökologische Kommunikation*, Westdeutscher Verlag, Opladen (1986).
- [17] U. Beck: *Risikogesellschaft – Auf dem Weg in eine andere Moderne*, Suhrkamp, Frankfurt am Main (1986); a) p. 258.
- [18] G. Hartkopf, E. Böhne, *Umweltpolitik*, Westdeutscher Verlag, Opladen (1983).
- [19] S. Böschen, M. Scheringer, J. Jaeger: "Wozu Umweltforschung – Über das Spannungsverhältnis zwischen Forschungstraditionen und umweltpolitischen Leitbildern; Teil II: Zum Leitbild 'Reflexive Umweltforschung' ", *GAIA* 10 (2001) im Druck.
- [20] O. Renn: "Wissenschaftliche Politikberatung im Spannungsfeld von Wertewandel und Legitimationskrise", in H. Klages (Ed.): *Arbeitsperspektiven Angewandter Sozialwissenschaft*, Westdeutscher Verlag, Opladen (1984), p. 112–154.
- [21] M.R. Allen, P.A. Stott, J.R.B. Mitchell, R. Schnur, T.L. Delworth: "Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change", *Nature* 407 (2000) 617–620.
- [22] R. Merton: *Entwicklung und Wandel von Forschungsinteressen – Aufsätze zur Wissenssoziologie*, Suhrkamp, Frankfurt am Main (1985), insbesondere: Die normative Struktur der Wissenschaft, p. 86–99.
- [23] M. Berg, M. Scheringer: "Problems in environmental risk assessment and the need for proxy measures", *Fresenius Environmental Bulletin* 3 (1994) 487–492.
- [24] J. Jaeger: "Exposition und Konfiguration als Bewertungsebenen für Umweltgefährdungen", *Zeitschrift für angewandte Umweltforschung* 11 (1998) 444–466; a) p. 447f.
- [25] G. Wood: "Regionale Geographie im Umbruch? – Ansätze einer sozialwissenschaftlichen 'New Regional Geography' im angelsächsischen Sprachraum", *Berichte zur deutschen Landeskunde* 70 (1996) 55–72.
- [26] R. Carson: *Silent Spring*, Houghton Mifflin, Boston (1962).
- [27] G.J. Marco, R.M. Hollingworth, W. Durham: *Silent Spring Revisited*, American Chemical Society, Washington DC (1987).
- [28] G. Küppers, P. Lundgreen, P. Weingart: *Umweltforschung – die gesteuerte Wissenschaft? Eine empirische Studie zum Verhältnis von Wissenschaftsentwicklung und Wissenschaftspolitik*, Suhrkamp, Frankfurt am Main (1978).
- [29] F. Korte, W. Klein, B. Drefahl: "Technische Umweltchemikalien, Vorkommen, Abbau und Konsequenzen", *Naturwissenschaftliche Rundschau* 23 (1970) 445–457.
- [30] D. Henschler: "Veränderungen der Umwelt – Toxikologische Probleme", *Angewandte Chemie* 85 (1973) 317–326; a) p. 324.
- [31] F. Korte: "Rückstandsprobleme", *Natur und Landschaft* 44 (1969) 225–228.
- [32] F. Korte: "Was sind Umweltchemikalien, welches ihre Probleme?", *Chemosphere* 5 (1972) 183–185.
- [33] M. Perscheid, H. Schlüter, K. Ballschmiter: "Aerober Abbau von Endosulfan durch Bodenmikroorganismen", *Zeitschrift für Naturforschung* 28c (1973) 761–763.
- [34] U. Niederschulte, K. Ballschmiter: "Isolierung und Anreicherung von Chorphenoxyessigsäuren aus Wasser mit makroretikulären Adsorberharzen XAD-2 und XAD-7", *Zeitschrift für Analytische Chemie* 269 (1973) 360–363.
- [35] K. Ballschmiter: "Allgegenwartskonzentration von Industriechemikalien?", *Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium* 27 (1979) 542–546.
- [36] W. Stumm, J.J. Morgan: *Aquatic Chemistry*, Wiley-Interscience, New York (1971, 21981).
- [37] C.E. Junge: "Transport mechanisms for pesticides in the atmosphere", *Pure and Applied Chemistry* 42 (1975) 95–104.
- [38] W. Stumm, R.P. Schwarzenbach, L. Sigg: "Von der Umwelanalytik zur Ökotoxikologie – ein Plädoyer für mehr Konzepte und weniger Routinemessungen", *Angewandte Chemie* 95 (1983) 345–355.
- [39] M.J. Molina, F.S. Rowland: "Stratospheric sink for chlorofluoromethanes – Chlorine atom-catalysed destruction of ozone", *Nature* 249 (1974) 810–812.
- [40] E.D. Goldberg: "Synthetic organohalides in the sea", *Proceedings of the Royal Society of London B* 189 (1975) 277–289.
- [41] C.E. Junge: "Residence time and



Martin Scheringer: Geboren 1965 in Aachen, Nordrhein-Westfalen. Studium der Chemie und Theoretischen Physik an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz; 1990 Diplomchemiker. 1991 bis 1996 Dissertation an der Abteilung für Umweltnaturwissenschaften der ETH Zürich zum Thema Bewertung von Umweltchemikalien (gefördert durch die Studienstiftung des deutschen Volkes); 1992 bis 1995 Mitarbeit im disziplinenübergreifenden Polyprojekt "Risiko und Sicherheit technischer Systeme". Seit 1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Gruppe für Sicherheit und Umweltschutz am Laboratorium für Technische Chemie der ETH Zürich. Forschungstätigkeit in den Bereichen Umweltchemie,

Bewertung von Umweltveränderungen, Entwicklung von Nachhaltigkeitsindikatoren, umweltbezogene Produktentwicklung.

Jochen Jaeger: Geboren 1966 in Eutin, Schleswig-Holstein. Studium der Physik an der Christian-Albrechts-Universität Kiel und der ETH Zürich; Diplom 1992. Dissertation an der Abteilung für Umweltnaturwissenschaften der ETH mit einem transdisziplinären Forschungsansatz zum Problem der Landschaftszerschneidung (gefördert durch die Studienstiftung des deutschen Volkes). Mitarbeiter an der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart; Mitwirkung u.a. im Projekt "Mediation bei der Erstellung von Umweltqualitätszielen". Beteiligung am Projekt "Synoikos - Nachhaltigkeit und urbane Gestaltung" an der ETH Zürich. Lehraufträge an der Universität Stuttgart. Seit Februar 2001 Forschungstätigkeit an der Carleton University in Ottawa (Kanada) als Stipendiat der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina. Arbeitsschwerpunkte in den Bereichen Landschaftsökologie, Erfassung und Bewertung von strukturellen Landschaftsveränderungen, Auswirkungen von Verkehrsnetzen auf die Landschaft, Entwicklung von Landschaftsstrukturmaßen.



Stefan Böschen: Geboren 1965 in Waldshut. Studium des Chemieingenieurwesens mit Diplomabschluß, 1995–1998 Vertiefung in Philosophie sowie Soziologie. Promotion in Soziologie mit einer Arbeit zur "Risikogenese", der Erarbeitung von Risiko-Wissen im Laufe der Geschichte, analysiert an vier Fallstudien. Seit 1999 an der Universität Augsburg im Sonderforschungsbereich 536 "Reflexive Modernisierung" tätig im Projekt "Möglichkeiten und Grenzen der Wissenschaftsfolgenabschätzung". Interessensgebiete: Wissenschafts- und Technikforschung, Umweltforschung, Institutionentheorie.



- variability of tropospheric trace gases", *Tellus* 26 (1974) 477–488.
- [42] D. Meadows, D. Meadows, P. Zahn, P. Milling: *Die Grenzen des Wachstums*, DVA, Stuttgart (1973, 161994); a) p.73.
- [43] L. Sigg, W. Stumm: *Aquatische Chemie*, Verlag der Fachvereine, Zürich (1989).
- [44] D. Mackay, S. Paterson: "Calculating fugacity", *Environmental Science and Technology* 15 (1981) 1006–1014.
- [45] W.A. Jury, W.F. Spencer, W.J. Farmer: "Behavior assessment model for trace organics in soil: I – Model description", *Journal of Environmental Quality* 12 (1983) 558–564.
- [46] R.P. Schwarzenbach, D. Imboden: "Modelling concepts for hydrophobic organic pollutants in lakes", *Ecological Modelling* 22 (1983/1984) 171–212.
- [47] D. Lenoir: "Curricula for environmental chemistry", *Environmental Science and Pollution Research* 4 (1997) 235–240.
- [48] F. Korte: *Lehrbuch der Ökologischen Chemie*, Thieme, Stuttgart (1980, 31992).
- [49] O. Hutzinger (Ed.): *Handbook of Environmental Chemistry*, Springer, Heidelberg, (1980).
- [50] R. Koch: *Umweltchemikalien*, Verlag Chemie, Weinheim (31995)
- [51] S.A. Levin, M.A. Harwell, J.R. Kelly, K.D. Kimball: *Ecotoxicology: Problems and Approaches*, Springer, New York (1989).
- [52] Sachverständigenrat für Umweltfragen: *Umweltgutachten 1987*, Metzler-Poeschel, Stuttgart (1987), insbesondere p. 446.
- [53] M. Kloepfer, C. Franzius, S. Reinert: *Zur Geschichte des deutschen Umweltrechts*, Duncker & Humblot, Berlin (1994).
- [54] P. Koller: "Die rechtliche Umsetzung ökologischer Forderungen", in J. Nida-Rümelin, D. v.d. Pforten (Ed.): *Ökologische Ethik und Rechtstheorie*, Nomos, Baden-Baden (1995), p. 127–147.
- [55] G. Winter: "Redesigning joint responsibility of industry and government", in G. Winter (Ed.): *Risk Assessment and Risk Management of Toxic Chemicals in the European Community*, Nomos, Baden-Baden (2000), p. 177–184.
- [56] D. Gillotay, P.C. Simon: "Temperature dependence of ultraviolet absorption cross-sections of alternative chlorofluoroethanes", *Journal of Atmospheric Chemistry* 12 (1991) 269–285.
- [57] K. Ballschmiter: "Globale Verteilung von Umweltchemikalien", *Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium* 33 (1985) 206–208.
- [58] M.E. Stephenson: "An approach to the identification of organic compounds hazardous to the environment and human health", *Ecotoxicology and Environmental Safety* 1 (1977) 39–48.
- [59] W. Klöpffer: "Persistenz und Abbaubarkeit in der Beurteilung des Umweltverhaltens anthropogener Chemikalien", *Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie* 2 (1989) 43–51.
- [60] F. Schmidt-Bleek, H.J. Hamann: "Priority setting among existing chemicals for early warning", in *Environmental Modelling for Priority Setting among Existing Chemicals*, Ecomed, Landsberg (1986), p. 455–464.
- [61] R. Frische, G. Esser, W. Schönborn, W. Klöpffer: "Criteria for assessing the environmental behavior of chemicals – Selection and preliminary quantification", *Ecotoxicology and Environmental Safety* 6 (1982) 283–293.
- [62] D. Freitag, H. Geyer, A. Kraus, R. Viswanathan, D. Kotzias, A. Attar, W. Klein, F. Korte: "Ecotoxicological profile analysis VII – Screening chemicals for their environmental behavior by comparative evaluation", *Ecotoxicology and Environmental Safety* 6 (1982) 60–81.
- [63] F. Schmidt-Bleek, W. Haberland: "Zur Bewertung von Umweltchemikalien", *Zeitschrift für Umweltpolitik* 2 (1979) 127–144.
- [64] F. Schmidt-Bleek, W. Haberland, A.W. Klein, S. Caroli: "Steps towards environmental hazard assessment of new chemicals (including a hazard ranking scheme, based upon Directive 79/831/EEC)", *Chemosphere* 11 (1982) 383–415.
- [65] A. von Gleich: "Ökologische Kriterien der Technik- und Stoffbewertung", in R. von Westphalen (Ed.): *Technikfolgenabschätzung als politische Aufgabe*, Oldenbourg, München (1997) 499–570, insbesondere p. 503.
- [66] World Commission on Environment and Development: *Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford (1987).
- [67] J.S. Gray, J.M. Bowers: "Towards a scientific definition of the precautionary principle", *Marine Pollution Bulletin* 32 (1996) 768–771.
- [68] Statens Offentliga Utredningar (Committee on New Guidelines on Chemicals Policy): *Summary of the Report of the Swedish Committee on New Guidelines on Chemicals Policy*, Statens Offentliga Utredninga, Stockholm (2000).
- [69] H. Parlar, D. Angerhöfer: *Chemische Ökotoxikologie*, Springer, Heidelberg (1991, 21995).
- [70] R.P. Schwarzenbach, D. Imboden, P. Gschwend: *Environmental Organic Chemistry*, Wiley, New York (1993).
- [71] C. Bliefert: *Umweltchemie*, Verlag Chemie, Weinheim (1994).
- [72] M. Held: *Chemiepolitik – Gespräch über eine neue Kontroverse*, Verlag Chemie, Weinheim (1988).
- [73] M. Held: *Leitbilder der Chemiepolitik*, Campus, Frankfurt am Main (1991).
- [74] P. Kating, H. Fischer: "Ausbildungs-integrierter Umweltschutz durch Chemie. Erfahrungen mit der Sonderabfallreduktion in einem Chemieanfängerpraktikum", *Chemie in unserer Zeit* 29 (1995) 101–106.
- [75] B. Schröder: "Wie werden wir Chlorphenole und Chlorfluorkohlenstoffe los?", *Chemie in unserer Zeit* 29 (1995) 193.
- [76] M. Scheringer, M. Berg, U. Müller-Herold: "Jenseits der Schadensfrage – Umweltschutz durch Gefährdungsbegrenzung", in M. Berg, G. Erdmann, M. Hofmann, M. Jaggy, M. Scheringer, H. Seiler (Ed.): *Was ist ein Schaden? – Zur normativen Dimension des Schadensbegriffes in der Risikowissenschaft*, Verlag der Fachvereine, Zürich (1994), p. 115–146.
- [77] M. Scheringer: *Persistenz und Reichweite von Umweltchemikalien*, Wiley-VCH, Weinheim (1999).
- [78] O. Höffe: *Moral als Preis der Moderne*, Suhrkamp, Frankfurt am Main (1993), insbesondere p. 256f.
- [79] M. Scheringer: "Persistence and spatial range as endpoints of an exposure-based assessment of organic chemicals", *Environmental Science and Technology* 30 (1996) 1652–1659.
- [80] U. Müller-Herold: "A simple general limiting law for the overall decay of organic compounds with global pollution potential", *Environmental Science and Technology* 30 (1996) 586–591.
- [81] D.H. Bennett, T.E. McKone, M. Matthies, W.E. Kastenberg: "General formulation of characteristic travel distance for semivolatile organic chemicals in a multimedia environment", *Environmental Science and Technology* 32 (1998) 4023–4030.
- [82] K. Fenner, M. Scheringer, K. Hungerbühler: "Persistence of parent compounds and transformation products in a level IV multimedia model", *Environmental Science and Technology* 34 (2000) 3809–3817.
- [83] E.G. Hertwich, T.E. McKone: "Pollutant-specific scale of multimedia models and its implications for the potential dose", *Environmental Science and Technology* 35 (2001) 142–148.
- [84] A. von Gleich: "Werkzeugcharakter, Eingriffstiefe und Mitproduktivität als zentrale Kriterien der Technikbewertung und Technikwahl", in F. Rauner (Ed.): *Gestalten – eine neue gesellschaftliche Praxis*, Verlag Neue Gesellschaft, Bonn (1988), p. 115–147.
- [85] H. Fischer: *Plädoyer für eine Sanfte Chemie*, Verlag C.F. Müller; Alembik Verlag, Braunschweig (1993).
- [86] C. Ewen, F. Ebinger, C.-O. Gensch, R. Grießhammer, C. Hochfeld, V. Wollny: *Hoechst Nachhaltig*, Oekoinstitut e.V. (1997).
- [87] E.G. Hertwich, J. Hammit, W. Pease: "A theoretical foundation for life-cycle assessment", *Journal of Industrial Ecology* 4/1 (2000) 13–28.
- [88] J. Weiner: *Die Klima-Katastrophe – Wie der Treibhauseffekt unser Leben verändern wird*, Goldmann, München (1995).
- [89] H.-J. Luhmann: "Der Homo industrialis und der Klimawandel – Auf der Suche nach der verlorenen Erinnerung an des Erschrecken über sich selbst", *NEUE ZÜRCHER ZEITUNG* (29. März 2000) 79.

(Eingegangen am 20. November 2000; überarbeitete Fassung am 6. Februar 2001; WG)