



Berichte und Abhandlungen / Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (vormals Preußische Akademie der Wissenschaften) ; Band 5

Berlin: Akademie-Verlag, 1998
ISBN: 3-05-003273-1

Persistent Identifier: [urn:nbn:de:kobv:b4-opus4-28697](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:b4-opus4-28697)

Die vorliegende Datei wird Ihnen von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften unter einer Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (cc by-nc-sa 4.0) Licence zur Verfügung gestellt.



BERLIN-BRANDENBURGISCHE
AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

(vormals Preußische Akademie der Wissenschaften)

Berichte und Abhandlungen

Band 5



Akademie Verlag

Herausgeberin: Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
Redaktion: Anne-Katrin Ziesack, Kathrin Künzel
Redaktionsschluß: 31. März 1998

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften :
Berichte und Abhandlungen / Berlin-Brandenburgische
Akademie der Wissenschaften (vormals Preußische Akademie
der Wissenschaften). – Berlin : Akademie Verl.
Erscheint jährlich – Aufnahme nach Bd. 1 (1995)

ISBN 3-05-003273-1

© Akademie Verlag GmbH, Berlin 1998
Der Akademie Verlag ist ein Unternehmen der R. Oldenbourg-Gruppe.

Das eingesetzte Papier ist alterungsbeständig nach DIN/ISO 9706.

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden.

Druck und Bindung: Druckhaus „Thomas Müntzer“ GmbH, Bad Langensalza

Printed in the Federal Republic of Germany

Inhalt

Wissenschaftliche Vorträge im Plenum

- Hanfried Helmchen Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen
Patienten 9
- Helga Haftendorn Wasser als Problem der internationalen Politik . . 31

Wissenschaftliche Vorträge in den Klassen

- Wolfgang Beitz Konstruktionswissenschaft/
Konstruktionstechnik 61
- Stefan H.E. Kaufmann Infektabwehr gegen intrazelluläre Bakterien:
Von der Entdeckung des Tuberkulose-
erregers bis zur Aufklärung der zellulären
Immunmechanismen 71

Akademievorlesungen

- Hans-Joachim Queisser Research in Silicon Valley –
Forschung im Silicon Valley 93
- Reinhard Hüttl Neuartige Waldschäden 125
- Günter Spur Thesen zum Selbstverständnis
der Technikwissenschaft. 217

Festschrift zum 100. Geburtstag von Hans Faltin und zum 25. Todestag von Walther Pauer

Achim Dittmann	Laudatio	247
Wolfgang Fratzscher	Die Sektion für Maschinenbau an der Deutschen Akademie der Wissenschaften	255
	Gedanken zum Wirken von Hans Faltin	257
Werner Albring	Erinnerungen an Walther Pauer	267

Ernst Mayr-Lecture

Rüdiger Wehner	Einführung	283
Ernst Mayr	Was ist eigentlich die Philosophie der Biologie?	287

Sonstige Beiträge

Werner Albring	Erinnern an Gotthilf Hagen aus Anlaß des 200. Geburtstages	305
----------------	----------------------------------------------------------------------	-----

Anhang

Hinweise zu den Autoren	319
-----------------------------------	-----

**Wissenschaftliche Vorträge
im Plenum**

Hanfried Helmchen

Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Patienten

*(Vortrag vor den Mitgliedern der Berlin-Brandenburgischen
Akademie der Wissenschaften am 26. Juni 1997)*

Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Patienten ist nicht nur innerhalb der Medizin, sondern jüngst auch – anlässlich der Verabschiedung der sogenannten „Europäischen Bioethik-Konvention“¹ – in der Öffentlichkeit zu einem Thema geworden. Ich will kurz die Gründe dafür aufzeigen und dann fragen:

1. Ist solche Forschung wirklich notwendig?
2. Ist solche Forschung ethisch zu rechtfertigen?
3. Ist solche Forschung rechtlich zulässig?

1 Zur Aktualität des Themas

Medizinische Ethikkommissionen haben sich zunehmend mit Forschungsprojekten auseinanderzusetzen, die Patienten einbeziehen wollen, welche nicht fähig sind, nach entsprechender Aufklärung eine gültige Einwilligung zu geben. Das trifft

¹ 12. September 1990: Das Minister-Komitee des Europarates (ER) bildet eine ad hoc Beratergruppe, das spätere Steering Committee on Bioethics (CDBI), mit dem Auftrag, eine Rahmenkonvention zur Bioethik auszuarbeiten; Juli 1994: öffentliche Bekanntgabe eines Entwurfes; 7. Juni 1996: Annahme des erheblich überarbeiteten endgültigen Entwurfes der Konvention durch das CDBI (mit 28 von 31 Stimmen, 2 Enthaltungen und 1 Gegenstimme (der deutschen)); 26. September 1996: fast einhellige Annahme mit 20 Änderungsvorschlägen durch die Parlamentarische Versammlung des ER (nur gegen fast alle Stimmen der 18 deutschen Vertreter); 19. November 1996: Verabschiedung durch das Minister-Komitee des ER (bei mit Entscheidung des Bundestages begründeter Stimmenthaltung Deutschlands sowie – aus anderen Gründen – Belgiens und Polens); 4. April 1997: Auslegung der Konvention zur Ratifizierung, die bereits am ersten Tag von 21 der 40 Mitgliedsländer unterzeichnet wird (jedoch bisher nicht von Deutschland) [3, 4].

keineswegs nur für Forschungsprojekte in der Pädiatrie und der Psychiatrie zu, sondern ebenso für Forschungsprojekte in der Neurologie und Neurochirurgie und vor allem in der Anästhesiologie und Intensivmedizin. Unsicherheit in diesem Problemfeld wird deutlich, wenn die Beurteilungen mehrerer Ethikkommissionen zum gleichen, z. B. multizentrischen, Projekt einander widersprechen. Das gilt besonders für Forschungsprojekte, die sich nicht mit therapeutischer Forschung im engen Wortsinn beschäftigen. Offensichtlich besteht also Bedarf an klaren und verpflichtenden Beurteilungsregeln.

In Deutschland beschäftigt sich der Arbeitskreis medizinischer Ethikkommissionen [1] seit längerem intensiv mit dem Thema und die ‚Zentrale Kommission zur Wahrung ethischer Grundsätze in der Medizin und ihren Grenzgebieten‘, kurz ‚Zentrale Ethikkommission‘, hat im April 1997 eine Stellungnahme vorgelegt [2]. In den Blick der Öffentlichkeit rückte das Thema seit 1994 besonders durch die Diskussion einer vom Europarat ausgearbeiteten ‚Konvention zum Schutz von Menschenrechten und Würde des Menschen im Hinblick auf die Anwendung in Biologie und Medizin: „Bioethik-Konvention“‘. Vor allem Artikel 17.2 dieser am 26. September 1996 von der Europäischen Versammlung als gemeinsamer Rechtsrahmen für biomedizinische Forschung mit Menschen angenommenen Konvention wurde bis zuletzt kontrovers diskutiert. Dieser Artikel versucht nach Maßgabe einer Reihe von Voraussetzungen, die in den vorangehenden Artikeln 17.1, 16 und 5 formuliert sind, Kriterien aufzustellen, nach denen Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Personen, die keinen direkten Nutzen für die Gesundheit der betroffenen Person erwarten läßt („does not have the potential to produce results of direct benefit to the health of the person concerned“), als Ausnahme zugelassen werden kann.

Diese Position wurde u. a. von der holländischen Rechtsgelehrten Roscam Abbing [5] in erster Linie mit den folgenden Argumenten begründet:

- ohne diese nicht-therapeutische Forschung könnten gerade die Bedingungen, die den Patienten einwilligungsunfähig machen, kaum untersucht und behandelt werden;
- die Forschung trägt zur Gesundheit von Gruppen anderer Patienten mit der gleichen Krankheit bei (Gruppenbindung);
- im Hinblick auf die Belastungen der nächsten Angehörigen und der Gesundheitsversorgungsausgaben besteht für die Gesellschaft ein großes potentiell Interesse an der Forschung;
- Solidarität kann von jedem Bürger erwartet werden.

Während medizinische Forschung ohne direkten potentiellen Nutzen für die nicht-einwilligungsfähige Person in der Formulierung des Artikels 17.2 in anderen europäischen Ländern in Ausnahmen als zulässig angesehen wird, ist sie nach deutschem Recht eher nicht zulässig. Sie wird auch in der deutschen Öffentlichkeit

kritisch beurteilt oder gar heftig abgelehnt, wie dies u. a. bei einer Anhörung der Bundestagsausschüsse für Recht, für Gesundheit, und für Bildung, Wissenschaft und Forschung am 17. Mai 1995 und auf dem Ärztekongreß „Medizin und Gewissen – 50 Jahre nach dem Nürnberger Ärzteprozeß“ vom 25.–27. Oktober 1996 in Nürnberg [6] deutlich wurde. Die Hauptargumente der Kritiker von Forschung ohne direkten Nutzen für den nicht-einwilligungsfähigen Patienten besagen,

- daß kein wirklicher Bedarf für diese Forschung besteht;
- daß diese Forschung mit dem durch die Verfassung garantierten Respekt vor der Würde des Menschen nicht übereinstimmt;
- daß diese Art von Forschung – nicht zuletzt aufgrund der deutschen Erfahrungen mit kriminellen Menschenversuchen während des Nationalsozialismus und besonders im Hinblick auf die an den psychisch Kranken begangenen Verbrechen [7, 8] – nicht zu kontrollieren sei und zum Signal für einen Dambruch werden könnte.

Als Konsequenz aus dieser öffentlichen Debatte hat sich Deutschland als eines von drei europäischen Ländern bei der Abstimmung über die o. g. Konvention 1996 im Ministerkomitee des Europarates der Stimme enthalten.

2 Umriss des Problemfeldes

Das so umrissene Problemfeld enthält einige Komponenten, auf die ich in aller Kürze näher eingehen muß, bevor ich die eingangs gestellten Fragen beantworten werde. Diese Komponenten sind:

1. Selbstbestimmung und Würde
2. Rechtsrahmen
3. Medizinische Forschung.

Selbstbestimmung und Würde

Die Achtung der Selbstbestimmung des Patienten ist in der modernen Medizin höchst bedeutungsvoll geworden. Sie bedeutet zu akzeptieren, daß jede Person das Recht hat, entsprechend ihren Werten und Überzeugungen selbst zu entscheiden, ob und was sie im Hinblick auf ihre Gesundheit tun will [9]. Dem entspricht der Respekt vor den persönlichen Einstellungen, der körperlichen Integrität und dem privaten Raum des Patienten als Konstituenten seiner Würde. Die Achtung der Menschenwürde kommt vor allem im direkten Miteinander zwischen Menschen zum Ausdruck, hier also im Umgang des Arztes mit dem Patienten, insbesondere in der sorgfältigen Beachtung seiner Wünsche, Interessen, Ansichten, sozialen und

kulturellen Werte. Dieses Argument gewinnt noch an Bedeutung, wenn eine Intervention nicht nur dem jeweiligen Individuum, sondern, mit dem Erkenntnisgewinn durch Forschung, auch einem über das Individuum hinaus zielenden Zweck dient, also auch 'fremdnützig' ist. Diese Beachtung der menschlichen Würde gilt für jede Forschung mit Menschen, aber ganz besonders für Forschung mit 'vulnerablen' Patienten, d. h. Patienten, deren Rechte verletzt werden könnten, weil sie wegen psychischer Krankheit oder körperlicher Krankheitszustände mit Störung des Bewußtseins oder weil es sich um Kinder handelt, nicht einwilligungsfähig sind.

Dies führte die von der holländischen Regierung mit der Untersuchung des Problems beauftragte Meijers-Kommission [10] zu der Empfehlung, daß in solchen Fällen und besonders bei nicht-therapeutischer Forschung

- neben der notwendigen Einwilligung nach Aufklärung durch den gesetzlichen Vertreter oder Betreuer (oder auch den nächsten Angehörigen in manchen Ländern außerhalb Deutschlands),
- die Risiken und Belastungen durch die Untersuchung höchstens 'minimal' sein dürfen und
- der Patient entsprechend seiner noch vorhandenen Einsichtsfähigkeit aufgeklärt sowie
- seine Ablehnung akzeptiert werden muß.

In diesem Zusammenhang sollte auch die Frage beantwortet werden, ob Forschung ohne direkten potentiellen individuellen Nutzen in jedem Falle der menschlichen Würde der teilnehmenden, nicht-einwilligungsfähigen Person zuwiderläuft. Die Meijers-Kommission argumentierte, daß in der Gesellschaft die Bedeutung des individuellen Beitrages zum Gemeinwohl allgemein akzeptiert sei und deshalb eine bestimmte Bereitschaft zur Teilnahme an medizinisch-wissenschaftlichen Untersuchungen vorhanden ist. Deshalb müßten nicht-einwilligungsfähige Personen nicht in jedem Fall ausgeschlossen werden, sondern könnten unter strengen Bedingungen auch in nicht-therapeutische medizinisch-wissenschaftliche Untersuchungen einbezogen werden [10]. Ein verwandtes Argument besagt, daß manche Menschen bereit sind, an solcher Forschung aus Solidarität mit anderen, die an der gleichen Krankheit leiden, teilzunehmen [11]. Derartige Bindungen könnten den Einschluß nicht-einwilligungsfähiger Personen in nicht-therapeutische Forschung unter einer Reihe von Bedingungen rechtfertigen.

Solche Bedingungen sind u. a., daß diese Forschung

- nicht anders als mit nicht-einwilligungsfähigen Patienten durchgeführt werden kann,
- für eine Gruppe von Personen mit der gleichen Krankheit bedeutsam ist und
- nicht mehr als 'minimale Risiken' und Belastungen bzw. Belästigungen einschließt.

Rechtsrahmen

Kritiker jeglicher Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Personen argumentieren, daß diese Forschung durch den Nürnberger Kodex von 1947 [12] und nachfolgende Regelwerke wie den UNO-Pakt über bürgerliche und politische Rechte von 1966 [13] verboten sei.

Und in der Tat könnte aus dem Kontext des Konzepts der „freien Einwilligung“ im Artikel 7 dieses Paktes geschlossen werden, daß die Beteiligung nicht-einwilligungsfähiger Patienten an medizinisch-wissenschaftlichen Untersuchungen ausgeschlossen ist. Liest man jedoch die Worte „seine freie Einwilligung“ in Artikel 7 so wie die Meijers-Kommission [10] „unter Berücksichtigung der Entwicklung der Auffassungen innerhalb der internationalen Gemeinschaft, dann ist die Betrachtungsweise berechtigt, daß das Wort ‘sein’ in ‘sein freier Wille’ nicht so strikt aufgefaßt werden soll, daß die Einwilligung eines Vertreters ausgeschlossen ist. Nach Ansicht der Kommission zwingen weder die ordnende noch die schützende Funktion des Rechts zu einer so engen Interpretation. Es ist offensichtlich, daß beide Funktionen immer in erheblichem Maße von ethischen und gesellschaftlichen Auffassungen beeinflußt werden. Außerdem ergibt sich aus den Vorarbeiten des Paktes, daß man das Problem nicht-therapeutischer medizinisch-wissenschaftlicher Untersuchungen früher nicht genau beachtet hat.“ Und weiter: „Unter den von der Kommission formulierten Bedingungen und unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die medizinische Notwendigkeit der wissenschaftlichen Untersuchung feststehen muß, bildet die Durchführung dieser Untersuchung mit Einwilligungsunfähigen, für die deren gesetzlicher Vertreter die Einwilligung gegeben hat, nach Ansicht der Kommission keinen Verstoß gegen Artikel 7 des Paktes.“

Die Meijers-Kommission kommt nach einer umfassenden Analyse zu dem Schluß, „daß die für die Auslegung von Artikel 7, zweiter Satz, wichtige Praxis der Anwendung in anderen Ländern und die Auffassungen über wissenschaftliche Untersuchungen mit Einwilligungsunfähigen in der internationalen Gemeinschaft keinen Anlaß dazu geben, anzunehmen, daß Artikel 7, zweiter Satz, die Tendenz hat, nicht-therapeutische medizinisch-wissenschaftliche Untersuchungen unmöglich zu machen. Artikel 7, zweiter Satz, hat die Absicht, Schutz zu bieten vor Auswüchsen. Wenn die Vorarbeiten des Paktes als ergänzendes Interpretationsmittel überhaupt zulässig sind, geben diese keinen Anlaß dazu, anderes anzunehmen.“

Gegner der Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Personen beziehen sich auch auf die erste Regel des Nürnberger Kodex. Sie besagt, daß nur Personen in Forschung einbezogen werden können, die ihre freiwillige Einwilligung nach Aufklärung („informed consent“) gegeben haben. Das Ziel dieser vor 50 Jahren getroffenen Feststellung war in erster Linie die Verdammung von „Forschung“, die von nationalsozialistischen Ärzten an unaufgeklärten, unfreiwilligen und getäuschten

Personen durchgeführt worden war. Der Nürnberger Kodex erwähnt hingegen keine nicht-einwilligungsfähigen Patienten, und seine Autoren hatten solche Patienten sehr wahrscheinlich auch nicht im Sinn. Jedenfalls steht der Nürnberger Kodex nur bei dieser Interpretation nicht im Widerspruch zur heute allgemein anerkannten Deklaration von Helsinki [14]. Diese 1964 vom Weltärztebund verabschiedete und bis heute mehrfach (1975 in Tokio, 1983 in Venedig, 1989 in Hongkong) revidierte Deklaration stellt im Abschnitt I, Absatz 11, fest, daß die Einwilligung in Forschung im Fall von nicht-einwilligungsfähigen Patienten durch den aufgeklärten gesetzlichen Vertreter gegeben werden kann. Hintergrund dieser Regelung war offensichtlich das Verständnis des Weltärztebundes dafür, daß auf klinische Forschung auch mit nicht-einwilligungsfähigen Patienten nicht verzichtet werden kann, wenn damit Diagnostik und Behandlung sowohl für den in die Forschung einbezogenen Patienten als auch für alle anderen Betroffenen verbessert werden können.

Die ärztliche Motivation zu dieser Forschung stammt aus der unmittelbaren Erfahrung des Leidens von Patienten, z. B. von Demenzkranken, sowie auch ihrer Verwandten und Pflegekräfte. Ärzte wollen solche Krankheitszustände wirksamer behandeln als dies derzeit möglich ist und deshalb auch nicht-einwilligungsfähige Patienten in jenen Fällen in Forschung einbeziehen, in denen es keinen anderen Weg gibt, dieses Ziel zu erreichen. Dabei ist richtig, daß nicht-einwilligungsfähige Patienten in der Tat besonders verletzlich sind, weil ihre Krankheit – nicht der Arzt! – sie der Möglichkeit beraubt, ihre Rechte selbst wahrzunehmen. Gerade deshalb bemühen sich Ärzte um Verbesserungen, die die Krankheit beseitigen oder zumindest soweit zurückdrängen, daß der Patient die Fähigkeit zur Ausübung seiner Rechte wiedergewinnt. Ärzte wollen hingegen nicht – wie von manchen Kritikern unterstellt wird – diese Patienten für Forschung „verfügbar“ machen, weil sie schwach und wehrlos sind, sondern sie vielmehr unter definierten Schutzmaßnahmen in Forschung einbeziehen, weil ihre Krankheit so schwer und wenig behandelbar ist, daß Ärzte aufgefordert sind, dagegen etwas zu tun. Diese Argumentation wird auch durch die ärztliche Berufsordnung, nach der der Arzt auch der Bevölkerung zu dienen hat [15], und durch das Grundgesetz, das die Freiheit der Forschung in Artikel 5 garantiert, unterstützt. Gleichwohl ist klar, daß diese Verpflichtungen und Rechte sekundär und begrenzt sind durch die primäre Verpflichtung des Arztes „der Gesundheit des einzelnen Menschen zu dienen“ [15]. Diese ethischen Normen haben sowohl in internationalen wie nationalen Richtlinien für Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Personen ihren Niederschlag gefunden. Sie wurden in erster Linie von Gremien der Profession, wie dem Weltärztebund (WMA) [14], dem Rat für Medizinische Wissenschaften (CIOMS) [16] und Nationalen Forschungsräten (siehe Übersicht bei Roscam Abbing) [5], publiziert. Jene Richtlinien finden ihren Ausdruck auch in allgemeinen oder speziellen

Gesetzen und in der Tatsache, daß eine Reihe bindender Regelungen auf sie Bezug nimmt. Jedoch gibt es spezielle gesetzliche Regelungen für Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Patienten bis heute nur in wenigen Ländern.

Dies soll anhand der deutschen Gesetzeslage illustriert werden. Im hier relevanten Kontext sind die wichtigsten allgemeinen Gesetze die Verfassung (GG), die die Würde und Selbstbestimmung des Menschen garantiert, und das Strafgesetzbuch (StGB) mit seinen Schutzvorkehrungen für Leib und Leben. Diese menschlichen Grundrechte werden spezifischer durch das Arzneimittelgesetz (AMG) geschützt, besonders mit seinen §§ 40 und 41, die die wissenschaftliche Untersuchung potentieller neuer Arzneimittel mittels klinischer Prüfungen bei Patienten regulieren. Entsprechend § 41 AMG sind klinische Prüfungen, also therapeutische Forschung im engen Sinn, auch mit nicht-einwilligungsfähigen Patienten dann zulässig, wenn ein gesetzlicher Vertreter oder Betreuer seine Einwilligung nach Aufklärung gegeben hat. Auf der Grundlage des seit 1992 gültigen Betreuungsrechts, das das alte Vormundschafts- und PflEGschaftsrecht abgelöst hat, darf der Betreuer aber nur in Übereinstimmung mit den Wünschen und Interessen des Patienten einwilligen, d. h. er darf nicht in Forschung einwilligen, die keinen potentiellen Nutzen für den Patienten hat.

Außerdem verpflichten sowohl die 1995 verabschiedete 5. Revision des AMG als auch die Ärztliche Berufsordnung den forschenden Arzt, die Ethikkommission einer Medizinischen Fakultät oder einer Landesärztekammer zu konsultieren. Diese Ethikkommissionen beraten den forschenden Arzt entsprechend der revidierten Deklaration von Helsinki über die Regeln, die der Arzt kennen und beachten muß [17].

Das Arzneimittelgesetz ist in Deutschland das einzige Gesetz, das spezifisch auf Forschung und dabei besonders auf den Schutz der Versuchsperson eingeht. Es regelt jedoch nur Arzneimittelforschung, nicht aber andere medizinische Forschung mit Menschen. Für diese Art von Forschung ist die gesetzliche Situation ziemlich unklar. Das Recht im Allgemeinen bietet wenig Hilfe für die rechtliche Würdigung von medizinischer Forschung. Es hat so viele Lücken, daß es nicht einmal die Voraussetzungen für die Gültigkeit der Einwilligung des Patienten nach Aufklärung ausreichend regelt. Diese Lücken wurden bisher durch die Rechtsprechung mit der Schaffung von Präzedenzfällen gefüllt, aber nur sehr selten unter Bezug auf die Forschung. Angesichts dieses Defizits muß die Frage gestellt werden, ob und wie weit die §§ 40 und 41 des Arzneimittelgesetzes zur rechtlichen Beurteilung von medizinischer Forschung außerhalb der Arzneimittelforschung in Analogie angewandt werden können [11].

Einige andere Länder haben spezifische Gesetze für nicht-therapeutische Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Patienten entwickelt, so Frankreich mit dem französischen Forschungsgesetz von 1988 [18] und Kanada mit einem Civil Code

von 1993 [5], ebenso wie England mit Vorschlägen der Britischen Rechtskommission für entsprechende gesetzliche Regelungen [19, 20] und auch Holland, wo die bereits erwähnte Kommission des Justiz- und des Gesundheitsministers den Entwurf eines Gesetzes über medizinisches Experimentieren (1992) vorgelegt hat.

Diese Kommission hat sorgfältige „Empfehlungen im Hinblick auf medizinisch-wissenschaftliche Untersuchungen mit Kindern und nicht-einwilligungsfähigen Erwachsenen“ gegeben [10]. Gleichzeitig, aber unabhängig davon, hat sich 1991 in Deutschland ein Arbeitskreis aus Psychiatern, Juristen, Theologen und betroffenen Laien zur Analyse des Konfliktes zwischen Forschungsbedarf und Einwilligungproblematik gebildet und 1995

- Argumente für den Forschungsbedarf mit nicht-einwilligungsfähigen Patienten,
- Kriterien und Verfahren zur Feststellung von Einwilligungsunfähigkeit,
- Vorschläge für Schutzkriterien für den Patienten sowie
- Empfehlungen für Änderungen und/oder Ergänzungen des Arzneimittelgesetzes als der einzigen spezifischen Regelung für solche Forschung in Deutschland am Beispiel der Demenzkranken

publiziert [11].

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß bis heute publizierte internationale Richtlinien und Gesetze zu medizinischer Forschung mit Menschen

- nicht sehr spezifisch sind,
- der Genauigkeit einiger Definitionen, beispielsweise der des „minimalen Risikos“ (s. u.) , ermangeln und
- mehrdeutig sind im Hinblick auf Konzepte, wie
 - Nutzen (direkter versus kein Nutzen) und
 - Forschung (therapeutische versus nicht-therapeutische Forschung).

Medizinische Forschung

Zu der soeben erwähnten Mehrdeutigkeit kann ich hier nur zusammenfassen: Beim Konzept des *Nutzens*² besteht Unsicherheit im Hinblick auf die Direktheit oder Un-

² Der Standard des „besten Interesses“ kann hier in seinen verschiedenen Aspekten wie Wohlbefinden, Wohlfahrt, Wohl, Nutzen usw. ebensowenig diskutiert werden, wie sein Verhältnis zu verschiedenen Theorien des Guten, wie sie z. B. von Parfit [21] oder in der Position von Veatch [22] vorliegen, nach der es für einen Arzt unmöglich sein soll, festzustellen, was das Gute für einen anderen Menschen bedeutet. Jedoch soll hier die wichtige Beziehung von „Nutzen“ zu „bestem Interesse“ zumindest deskriptiv erwähnt werden. Zum Beispiel schließt die Definition des „besten Interesses“,

mittelbarkeit des potentiellen individuellen Nutzens, insbesondere im Hinblick auf seine Wahrscheinlichkeit (nicht auszuschließen; möglich; wahrscheinlich), weiterhin seinen Umfang und seine Stärke (fraglich; nachweisbar; überzeugend) und nicht zuletzt seine zeitliche Beziehung zur Intervention. Weiterhin legt der Ausdruck 'direkter' Nutzen nahe, daß es auch Formen des 'indirekten' oder 'mittelbaren' Nutzens gibt, denn die Spezifizierung eines Nutzens als 'direkt' wäre nicht nötig, wenn nur die beiden Kategorien 'Nutzen' und 'kein Nutzen' existierten.³ Bezüglich der *Forschung* unterscheidet die Deklaration von Helsinki zwischen verschiedenen Forschungstypen, insbesondere zwischen *klinischer* und *nicht-klinischer* Forschung [14]. Spezielle Empfehlungen in mehreren Ländern differenzieren dagegen hauptsächlich zwischen *therapeutischer* und *nicht-therapeutischer* Forschung. Diese Begriffe sind jedoch im Hinblick auf den individuellen Nutzen keineswegs identisch. Denn während die Deklaration von Helsinki unter nicht-klinischer Forschung nur Forschung ohne individuellen Nutzen für den teilnehmenden Patienten versteht, kann Forschung, die nicht als therapeutische Forschung im engen Sinn angesehen wird, also diagnostische, präventive, palliative sowie auch epidemiologische und Versorgungsforschung, durchaus auch potentiellen individuellen Nutzen haben.

wie sie die britische Rechtskommission 1995 gegeben hat, „vergangene und gegenwärtige Wünsche und Gefühle“ der nicht-einwilligungsfähigen Person ebenso ein wie das „Wohlergehen“ dieser Person. Im Hinblick auf die Möglichkeit eines Konfliktes zwischen dem „subjektiven“ und „objektiven“ besten Interesse der betroffenen Person taucht die Frage auf, welcher dieser beiden Aspekte des „besten Interesses“ als Nutzen Vorrang haben soll. Im Falle eines Forschungsprojektes ohne direkten Nutzen ist die Intervention wahrscheinlich nicht im „objektiv“ besten Interesse der nicht-einwilligungsfähigen Person. Jedoch muß sie keineswegs (und darf natürlich auch nicht) gegen das „objektiv“ beste Interesse der nicht-einwilligungsfähigen Person verstoßen und darf nicht gegen ihr „subjektiv“ bestes Interesse gerichtet sein. Mit anderen Worten: Im Hinblick auf das „beste Interesse“ einer in Forschung ohne direkten Nutzen einbezogenen nicht-einwilligungsfähigen Person sind nicht mehr als minimale Risiken oder vernachlässigbare Belästigungen vertretbar, wobei jedes ablehnende Verhalten der Person akzeptiert werden muß.

³ Ein Hinweis auf diese Interpretation kann in dem oben erwähnten Artikel 17.2 der 'Bioethikkonvention' gefunden werden. Dort wird festgestellt, daß Forschung, die „das Potential, Ergebnisse mit direktem Nutzen für die Gesundheit der betroffenen Person zu erbringen, nicht hat“, als Ausnahme zulässig ist, wenn sie „das Ziel verfolgt, letztlich Ergebnisse zu erlangen, die in der Lage sind, zum Nutzen der betroffenen Person oder anderer Personen beizutragen“ (*Hervorhebung durch den Autor*). Allerdings könnte die Spezifizierung eines Nutzens als 'direkt' auch den Wunsch ausdrücken, daß nur ein hoher Grad von 'Direktheit' des Nutzens Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Personen rechtfertigt.

Offensichtlich ist also die Breite der Definition von 'therapeutischer Forschung' von Bedeutung, weil therapeutische Forschung mit potentiellen individuellen Nutzen insofern identifiziert wird, als sie „Hoffnung auf Rettung des Lebens, Wiederherstellung der Gesundheit oder Abschwächung des Leidens“ [14] bietet, und weil der potentielle individuelle Nutzen ein entscheidendes Kriterium bei der Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Personen ist. Jedoch enthält nur die enge Definition von 'therapeutischer Forschung' kategorisch und per definitionem einen potentiellen individuellen Nutzen im Sinne eines unmittelbaren und direkten Nutzens, während sie diagnostische Forschung oder Forschung in den anderen erwähnten Gebieten, die alle auch einen potentiellen individuellen Nutzen haben können, ausschließt. Die Folge einer engen Definition von 'therapeutischer Forschung' ist also, daß nach weitverbreiteter Meinung Forschung in den anderen erwähnten Gebieten als nicht-therapeutische Forschung klassifiziert und mit der Bedeutung versehen wird, daß sie keinen potentiellen individuellen Nutzen hat.

Deshalb muß man sich klarmachen, daß die Grenze zwischen klinischer und nicht-klinischer Forschung nicht identisch ist mit derjenigen zwischen therapeutischer und nicht-therapeutischer Forschung⁴ und letztere nicht identisch ist mit der Grenze zwischen Forschung mit und Forschung ohne potentiellen individuellen Nutzen. Mit anderen Worten: Zwischen therapeutischer Forschung im engen Sinn mit unmittelbarem potentiellen individuellen Nutzen auf der einen und nicht-klinischer Forschung ohne individuellen Nutzen auf der anderen Seite gibt es klinische Forschungsbereiche wie die genannten, in denen jeweils geprüft werden muß, ob ein individueller Nutzen entweder unmittelbar oder nur mittelbar oder überhaupt nicht zu erwarten ist.

Diese notwendige Differenzierung zwischen den Kategorien 'Nutzen' versus 'kein Nutzen' und zwischen 'therapeutischer' versus 'nicht-therapeutischer' Forschung hat mit der empirischen Wirklichkeit der Medizin zu tun. Jedoch gibt es strenge Auffassungen dazu, daß solch induktive Argumentation seitens der Medizin den deontologischen oder anderen von der Gesellschaft gesetzten deduktiven Vorschriften nachgeordnet sein muß. Auch wurde in einem mehr politischen Sinn die Meinung vertreten, daß solche Formulierungen nichts anderes als eine Strategie seien, die grundsätzlich klare Grenze zwischen Nutzen und keinem Nutzen zu

⁴ Dies kann auch aus der Deklaration von Helsinki – obwohl sie nicht-klinische und nicht-therapeutische Forschung gleichsetzt – abgeleitet werden: Die Formulierung, daß bei nicht-klinischer Forschung „der Untersuchungsplan keine Beziehung zur Krankheit des Patienten hat“, impliziert, daß klinische Forschung jede Forschung umfaßt, die einen Bezug zur Krankheit des einzelnen Patienten hat, also auch Forschungsprojekte aus den erwähnten Forschungsgebieten außerhalb der therapeutischen Forschung im engen Sinn.

verwischen, und zwar mit der Absicht, medizinische Forschung in gefährliche Bereiche auszudehnen oder gar illegitime Forschung zu verbergen [23, 24].

Festzuhalten ist, daß *therapeutische Forschung* im engen Sinn, d. h. zuvorderst kontrollierte klinische Arzneimittelversuche, auch unter Einschluß nicht-einwilligungsfähiger Patienten sowohl nach Abschnitt I, Absatz 11 der Deklaration von Helsinki als auch nach § 41, Absatz 2–5 des AMG zulässig ist, wenn der gesetzliche Vertreter oder Betreuer des Patienten nach angemessener Aufklärung und unter der allgemeinen, im § 41, Absatz 1 AMG formulierten Voraussetzung einwilligt: „Die Anwendung des zu prüfenden Arzneimittels ist nach dem Kenntnisstand der medizinischen Wissenschaft angezeigt, um das Leben des Kranken zu retten, seine Gesundheit wiederherzustellen oder sein Leiden zu mindern.“ Dies stimmt mit der im § 1901 des BGB festgelegten Pflicht des Betreuers überein, seine Entscheidungen am Wohl und Willen des Patienten auszurichten, soweit der letztere bekannt ist und dem ‘besten Interesse’ des Kranken nicht entgegensteht.

Obwohl also therapeutische Forschung mit unmittelbarem potentiellen individuellen Nutzen bei nicht-einwilligungsfähigen Patienten gesetzlich zulässig ist, so gibt es in der Praxis doch häufig kaum überwindbare Schwierigkeiten. Besonders bei akuten Krankheitszuständen, z. B. bei akuten Schlaganfällen, ist kein Betreuer vorhanden, und die Einrichtung einer Betreuung nur zum Zwecke der Forschung ist fraglich. Wenn man in solch dringenden Fällen das Verfahren zur Bestellung eines Betreuers einleitet, dann geht das meist nicht so schnell, wie es die akute Behandlungsbedürftigkeit erfordert. § 41, Absatz 5 AMG eröffnet zwar darüber hinaus die Möglichkeit, notwendige Behandlungsinterventionen auch ohne Einwilligung des Betreuers durchzuführen, wenn erwartet werden kann, daß der Betreuer nachfolgend einwilligt. In jenen (üblichen) Fällen aber, in denen keine Betreuung besteht, ist die Möglichkeit eines solchen Vorgehens fraglich.

Zusätzlich sei erwähnt, daß nach § 40, Absatz 3 AMG Patienten von therapeutischer Forschung ausgeschlossen sind, wenn sie „durch Gerichtsbeschluß oder amtliche Verfügung in einer Institution verwahrt werden“, selbst wenn ihr Betreuer in eine solche Forschungsbehandlung einwilligen würde, wie z. B. bei dementen Patienten, die infolge von Unruhe und Verwirrtheit in einer Einrichtung geschlossen untergebracht sind und die dringender Behandlung bedürfen [25, 26].

Dies dient vorrangig dem Ausschluß jeglicher Form von Zwang. Es kann jedoch in Frage gestellt werden, ob diese Kranken in jedem Fall von Forschung mit potentiell spezifischen Nutzen für sie ausgeschlossen werden sollten [25]. In diesem Zusammenhang kann das ethische Prinzip des ‘primum nil nocere’ auch als „beraube einen Patienten nicht eines potentiellen Nutzens“ interpretiert werden. Dieses Argument kann auch von Bedeutung sein in Fällen von akuten (z. B. Delirium oder Schlaganfall) oder chronischen (d. h. Demenzen), körperlich begründeten psychi-

schen Erkrankungen, bei denen eine exzessiv restriktive Einstellung zur Einwilligung nach Aufklärung psychisch Kranke schädigen kann [26].

Nicht-therapeutische Forschung bei nicht-einwilligungsfähigen Erwachsenen ist jedoch in Deutschland, zumindest im Falle von Arzneimittelforschung, rechtlich nicht zulässig. Zulässig ist jedoch unter definierten Bedingungen gemäß § 40, Absatz 4 AMG Forschung bei Minderjährigen „zum Erkennen von Krankheiten“. Das „Erkennen von Krankheiten“ ist nicht näher definiert. Versteht man darunter die Entwicklung eines neuen diagnostischen Verfahrens, dann wird das in der Deklaration von Helsinki als ethisch vertretbar angesehen, wenn der in die Forschung einbezogene Patient „Hoffnung auf Rettung seines Lebens, Wiederherstellung seiner Gesundheit oder Abschwächung seines Leidens“ erwarten kann. Weil also diagnostische Forschung im engen Sinn im Hinblick auf einen potentiell unmittelbaren Nutzen für den Patienten als ethisch vertretbar angesehen werden kann, haben wir vorgeschlagen, die rechtliche Zulässigkeit dieser Forschung bei Minderjährigen auf nicht-einwilligungsfähige Erwachsene auszudehnen [11].

Problematisch wird es, wenn man dieses ‘Erkennen von Krankheiten’ in einem weiteren Sinn, nämlich der Erkennung von Entstehungsbedingungen und Ursachen von Krankheiten, interpretiert. Zwar kann auch eine solche Forschung in genau definierten und kontrollierten Ausnahmefällen als ethisch vertretbar begründet werden, wenn ein Nutzen für den Patienten zu erwarten ist. Wirklich kontrovers wird die Diskussion aber, wenn dieser potentielle individuelle Nutzen nur noch als mittelbar und wenig wahrscheinlich angesehen wird, also der Erkenntnisgewinn und damit die Fremdnützigkeit in den Vordergrund tritt. Ein potentiell wenigstens mittelbarer Nutzen kann beispielsweise dann angenommen werden, wenn Erkenntnisse über die Krankheitsentstehung eine Verbesserung der Therapie möglich erscheinen lassen, die auch dem in die Forschung einbezogenen Patienten noch zugute kommen könnte, z. B. bei sehr langer Krankheitsdauer oder bei zu Rückfällen neigenden Erkrankungen. Diese Annahme bedarf allerdings der Präzisierung zum Schutz des Patienten. Denn je geringer das Eigeninteresse des Patienten, um so stärker muß sein Schutz sein.

3 Zur Notwendigkeit und ethischen Vertretbarkeit

Die ‘Zentrale Ethikkommission’ hat zu dem Problem in folgender Weise Stellung genommen:

„Ein besonderes ethisches Dilemma tritt bei Forschungen auf, durch die voraussichtlich nicht der Betroffene selbst, immerhin aber andere Personen, die sich in der gleichen Altersgruppe befinden oder von der gleichen Krankheit oder Störung betroffen sind, von den gewonnenen Erkenntnissen Nutzen haben. Hier steht auf

der einen Seite das Verbot, eine Person ohne ihre Einwilligung einer Maßnahme zugunsten anderer zu unterziehen, die nicht ihrem eigenen Interesse dient ('Instrumentalisierungsverbot'). Auf der anderen Seite steht die ethische Überzeugung, einer Person geringfügige Risiken zumuten zu dürfen, wenn damit anderen eine große Hilfe erwiesen werden kann.

Zwar kann niemand – sei er einwilligungsfähig oder nicht – zur Hilfestellung für eine Gruppe zukünftiger Patienten durch Teilnahme an einer wissenschaftlichen Untersuchung verpflichtet werden, selbst wenn der Nutzen für diese Patienten erheblich und die Risiken für ihn selbst minimal sind. Jedoch erscheint eine Einbeziehung nicht-einwilligungsfähiger Personen in eine solche Untersuchung dann vertretbar, wenn – abgesehen von der Einhaltung weiterer Schutzkriterien – der gesetzliche Vertreter aus der Kenntnis der vertretenen Person (insbesondere ihrer früheren Lebenshaltung und -auffassung oder expliziter früherer Aussagen) ausreichende Anhaltspunkte hat, um auf ihre Bereitschaft zur Teilnahme an der Untersuchung schließen zu können und umgekehrt keine widerstrebenden Willensäußerungen des Betroffenen selbst vorliegen.“ [2].

Ein zentraler Punkt dieses Arguments ist, daß die Forschung Bezug zu der Krankheit haben muß, die zur Einwilligungsunfähigkeit des Patienten geführt hat. Bei Erwachsenen ist dieses Kriterium von entscheidender Bedeutung, um nicht-einwilligungsfähige Patienten von ethisch nicht zu rechtfertigender, ausschließlich fremdnütziger Forschung auszuschließen, wie sie im Abschnitt III der Deklaration von Helsinki als nicht-klinische biomedizinische Forschung definiert wird. Danach sind also z. B. Demenzkranke von Forschungsprojekten ausgeschlossen, die nicht mit der Demenz in Zusammenhang stehen.

Dieses Kriterium gilt jedoch nicht für Minderjährige, die – unabhängig von einer bestimmten Krankheit – entsprechend ihrem Entwicklungsstand noch nicht einwilligungsfähig sind. Dementsprechend stellt die französische Fassung des Kriteriums fest, daß das Forschungsprojekt für Personen des gleichen Alters, die an der gleichen Erkrankung oder den gleichen Behinderungscharakteristika leiden, von Wert sein muß [16]. Eine irische Fassung enthält eine offensichtlich breitere Definition, wonach ein Nutzen zumindest für andere Patienten erwartet werden muß [27].

Die Zentrale Ethikkommission hat folgende Schutzkriterien formuliert:

1. „Das Forschungsprojekt kann nicht auch an einwilligungsfähigen Personen durchgeführt werden.“ Das bedeutet, daß es keine alternative Forschungsstrategie gibt, um die Forschungsfrage zu beantworten. Wenn die Forschungsfrage jedoch auch mit einwilligungsfähigen Patienten geklärt werden kann, dann ist diese Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Patienten nicht zulässig.

Psychiatrische Beispiele für die hier gemeinten Forschungsfragen:

- a) Kann durch epidemiologisch geplante Beobachtung und Befragung die Annahme verifiziert werden, daß sich der Pflegebedarf im Spätstadium der

Demenz bei noch zu Hause lebenden Kranken und bei institutionalisierten Patienten unterscheidet, was ggf. eine Spezifizierung und Verbesserung der Pflege zur Folge hätte?

- b) Unterscheiden sich das Muster psychopathologischer Störungen und die Progressionsgeschwindigkeit später Demenzstadien bei jungen Alten (also den bis 85jährigen) und alten Alten (also den über 85jährigen)? Die Antwort wäre wichtig für die Lösung des Problems, inwieweit es sich bei der Demenz im hohen Alter 'nur' um akzentuiertes Altern oder um den Ausdruck von Hirnkrankheit handelt.
 - c) Wird der Verlauf in späten Stadien der Demenz von ganz anderen Faktoren bestimmt als der Verlauf in frühen Stadien? Eine positive Antwort würde die Perspektiven der Suche nach kausalen Behandlungsmöglichkeiten erweitern.
 - d) Hat das Gehirn auch noch in späten Demenzstadien ein regeneratives Potential, das dann als Grundlage für eine spezifische Therapie dienen könnte? Das ist eine Frage, die sich möglicherweise durch Erfassung des Profils von bestimmten Neurotrophinen, z. B. Nervenwachstumsfaktoren, im Venenblut oder mittels magnetresonanzspektroskopisch erfaßter Indikatoren des Stoffwechsels bestimmter cerebraler Proteine, also von Hirneiweißkörpern, beantworten ließe.
 - e) Bestimmte Erkenntnisse über spezielle Hirnfunktionen, z. B. als Grundlage sprachlicher Fähigkeiten, sind nur durch neuropsychologische Untersuchung von aphasischen Patienten zu gewinnen, also von Patienten mit Sprachstörungen infolge von Hirnverletzungen oder Schlaganfällen, die das Sprachverständnis und damit auch die Voraussetzungen für eine gültige Einwilligung nach Aufklärung beeinträchtigen können.
 - f) Eine Untersuchung zur Validierung einer angenommenen Einwilligungsunfähigkeit kann nur mit einer Gruppe von Menschen vorgenommen werden, von denen einige tatsächlich nicht einwilligungsfähig sind. So z. B. mit Patienten einer Gedächtnissprechstunde, die zur genauen Untersuchung ihrer Einwilligungsfähigkeit bereit sind, als deren Ergebnis sich jedoch herausstellen würde, daß bei einigen von ihnen die Einwilligungsfähigkeit für diese Untersuchung tatsächlich nicht gegeben war.
 - g) Im Bericht der Meijers-Kommission ist eine Reihe weiterer Beispiele für die Notwendigkeit nicht-therapeutischer Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Personen aufgeführt [10].
2. „Das Forschungsprojekt läßt wesentliche Aufschlüsse zur Erkennung, Aufklärung, Vermeidung oder Behandlung einer Krankheit erwarten.“ Rein replikative („me too“) Forschung und Forschung ausschließlich zum Zweck der Hypothesengenerierung ist demnach nicht vertretbar. Die Ethikkommission sollte bei ihrer Beurteilung hingegen auch den Bedarf an Forschung berücksichtigen, der

z. B. bei dementiellen Erkrankungen als zwingend anzusehen ist, weil eine über viele Jahre fortschreitende Demenz kontinuierliches Leiden des Patienten und seiner Angehörigen bedeutet, weil weiterhin ihre Ursachen bisher nicht behandelt werden können und schließlich Demenz infolge ihrer weiter zunehmenden Häufigkeit eine wachsende Belastung des öffentlichen Gesundheitswesens darstellt, wie nicht zuletzt die anhaltende Diskussion über das Pflegeversicherungs-gesetz und dessen Umsetzung in der Praxis belegen.

3. „Das Forschungsprojekt läßt im Verhältnis zum erwarteten Nutzen (nicht mehr als) vertretbare Risiken erwarten.“ In dieser Form sollte das Kriterium nur auf Forschungsprojekte angewandt werden, bei denen die beteiligten Patienten selbst, wenn auch möglicherweise nicht aktuell, so doch wenigstens im weiteren Verlauf ihrer Krankheit oder bei einem späteren Wiederauftreten, Nutzen daraus ziehen können (Fallgruppe 2 der Stellungnahme der Zentralen Ethikkommission). Bei Forschungsprojekten hingegen, von denen der Patient vermutlich keinen Nutzen haben wird, sondern nur andere Personen der gleichen Altersgruppe oder mit der gleichen Krankheit profitieren können (Fallgruppe 3 der Stellungnahme der Zentralen Ethikkommission), muß dieses Kriterium dahingehend schärfer gefaßt werden, „daß das Forschungsprojekt allenfalls minimale Risiken⁵ oder Belästigungen erwarten läßt.“
4. „Der gesetzliche Vertreter hat eine wirksame Einwilligung in die Maßnahme erteilt. Wobei vorausgesetzt ist, daß er aus Kenntnis der vertretenen Person ausreichende Anhaltspunkte hat, um auf ihre Bereitschaft zur Teilnahme an der Untersuchung schließen zu können.“ Hilfreich als beachtliches Indiz für den Wunsch des Patienten könnte deshalb eine zu Zeiten vorhandener Einwilligungs-

⁵ Zum Begriff des ‘*minimalen Risikos*’ führt die Zentrale Ethikkommission aus, daß er nur schwierig zu bestimmen ist, „aber durch die Unterscheidung von Risikostufen und durch eine Liste von Beispielen konkretisiert werden kann. Dazu können auch die medizinischen Fachverbände und die Ethikkommissionen beitragen. In jedem Fall ist zwischen objektivierbarem Risiko und subjektiver Belastung bzw. Beschwerden zu unterscheiden (z. B. birgt die Magnetresonanztomographie keine objektivierbaren Risiken, kann aber sehr wohl zu einer subjektiven Belastung werden, die zum Abbruch der Untersuchung führt). Insbesondere hinsichtlich subjektiver Beschwerden gibt es eine große individuelle Variation und große Unterschiede zwischen den Gruppen. Von einem ‘minimalen’ Risiko kann nach Auffassung der Kommission gesprochen werden, wenn z. B. Körperflüssigkeiten oder Gewebe in geringen Mengen im Rahmen von ohnehin notwendigen diagnostischen Maßnahmen oder Operationen gewonnen wird und deshalb kein zusätzliches Risiko für den Patienten beinhaltet. Auch bestimmte körperliche Untersuchungen (z. B. Sonographie, transkutane Gewebemessungen usw.) sowie bestimmte psychologische Untersuchungen (z. B. Fragebogeninterviews, Tests, Verhaltensbeobachtungen) fallen in diese Gruppe“ (2).

fähigkeit abgegebene sogenannte Patientenverfügung oder auch eine Bevollmächtigung in gesundheitlichen Angelegenheiten sein. Hierbei sollte der Betreuer auch Gedanken des Patienten zur Solidarität mit anderen Kranken nicht einfach außer acht lassen, nur weil der Patient seine Einwilligungsfähigkeit verloren hat. Eine zusätzliche Möglichkeit wird in dem holländischen Gesetzentwurf insofern erwähnt, als danach der in ein Forschungsprojekt einzubeziehende Teilnehmer nach Maßgabe seiner noch vorhandenen Verständnisfähigkeit aufgeklärt werden soll [28].

5. „Ein ablehnendes Verhalten des Betroffenen selbst liegt nicht vor.“ Das bedeutet, daß die Untersuchung in jedem Fall beendet werden muß, wenn der Patient zu erkennen gibt, daß ihm die Untersuchung so unangenehm ist, daß er sie beenden will. Dieses Kriterium wurde in den holländischen Vorschlägen dahingehend spezifiziert, daß die Forschungsuntersuchung nicht fortgeführt werden soll, wenn der nicht-einwilligungsfähige Patient protestiert und dieser Protest als abweichend vom üblichen Verhalten beurteilt werden kann, dem man in der betreffenden Gruppe von nicht-einwilligungsfähigen Menschen begegnet [28].
6. „Die zuständige Ethikkommission hat das Forschungsvorhaben zustimmend beurteilt.“ Zumindest in kontrovers diskutierten Fällen sollte die Ethikkommission ihr zustimmendes Votum im Hinblick auf die genannten Kriterien begründen und empfehlen, mit diesem Votum eine richterliche Entscheidung – sei es direkt, sei es für die (Eil-)Bestellung eines Betreuers – herbeizuführen.

Zusammengefaßt ist nicht-therapeutische Forschung bei nicht-einwilligungsfähigen erwachsenen Personen derzeit in Deutschland als rechtlich nicht zulässig anzusehen, wenn man die entsprechenden Vorschriften des Arzneimittelgesetzes auf die gesamte medizinische Forschung überträgt. Nicht-therapeutische Forschung mit potentiell unmittelbarem Nutzen, wie er z. B. bei diagnostischer Forschung im engeren Sinn für den in ein solches Forschungsprojekt einbezogenen Patienten erwartet werden kann, ist als ethisch vertretbar anzusehen und sollte für erwachsene nicht-einwilligungsfähige Patienten rechtlich ebenso zulässig werden, wie dies für Minderjährige der Fall ist. Nicht-therapeutische Forschung mit nur mittelbarem Nutzen für den Patienten selbst (Fallgruppe 2 der Stellungnahme der Zentralen Ethikkommission) oder mit Nutzen für die Gruppe der Patienten (Fallgruppe 3 der Stellungnahme der Zentralen Ethikkommission) erscheint als gesetzlich definierte Ausnahme unter der Voraussetzung ethisch vertretbar, daß streng definierte Schutzkriterien erfüllt sind und der Patient dabei keinen Risiken ausgesetzt wird. Ausschließlich fremdnützige Forschung im Sinne des Abschnittes III der Deklaration von Helsinki ist bei nicht-einwilligungsfähigen Patienten ethisch nicht vertretbar.

4 Zur Kritik

Wie bereits erwähnt, ziehen manche Gegner jeglicher Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Patienten aus den konzeptuellen Abwegen und dem verbrecherischen Mißbrauch der Psychiatrie (etwa zur 'Lösung der sozialen Frage' [29] durch Vernichtung 'lebensunwerten Lebens' [30]) den Schluß, jedes Abweichen vom Nürnberger Kodex sei zwangsläufig ein Schritt in den Abgrund – wie dies beispielsweise die 'Grafenecker Erklärung' von 1996 nahelegt. Diese fundamental kritische Haltung wird jedoch folgenden Problemen nicht gerecht:

1. Auf die ärztlich-ethische Motivation für die hier behandelte Forschung und auf die Auflösung des Widerspruches zwischen Nürnberger Kodex und Deklaration von Helsinki bin ich bereits früher eingegangen. Hier sollen jedoch noch zwei weitere Aspekte angesprochen werden.
2. Eine Tabuisierung von Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Kranken verhindert die Entwicklung von Kriterien und Verfahren, die unter Anerkennung der besonderen Verletzlichkeit dieser Kranken deren Schutz und die Einhaltung ethischer Standards sicherstellen. Gerade dies aber erscheint erforderlich. Denn einerseits wächst der Forschungsbedarf bezüglich schwerer und damit auch jener Krankheitszustände, die zur Einwilligungsunfähigkeit führen können (z. B. Hirntraumen, Schlaganfälle, Demenzen, Intoxikationen) oder die bei entwicklungsabhängig einwilligungsunfähigen Kindern auftreten. Das Beispiel breiter öffentlicher Überzeugung vom Nutzen der AZT-Versuche gegen AIDS in den 80er Jahren in den USA, die Kranke und auch Ärzte sogar zur Fälschung von Einschlusskriterien getrieben hat, läßt erkennen, daß Vorkehrungen zum Schutz vulnerabler Personen unterlaufen werden, wenn sie nicht problemadäquat sind [31]. Ein anderes Beispiel dafür könnte sein, daß ohne Kriterien für das Vorliegen von Einwilligungsfähigkeit diese nach klinischem Eindruck sehr weit gefaßt als gegeben angenommen oder die Schwelle für die Indikation zu ihrer expliziten Untersuchung so hoch gelegt wird, daß eine nicht vorhandene Einwilligungsfähigkeit gar nicht festgestellt werden kann (siehe dafür das o. g. Beispiel f). Andererseits enthält die Globalisierung der Forschung und der Nutzung ihrer Ergebnisse die Gefahr, daß ein regional absoluter Ausschluß jeglicher Instrumentalisierung des Menschen zur unkontrollierten und weitergehenden Instrumentalisierung von Menschen anderswo führen könnte [32]. Ethisch fragwürdig wäre dann sicher auch die Nutzung von Forschungsergebnissen aus den letztgenannten in den ersterwähnten Regionen.
3. Die Geschichte hat gezeigt, daß die Proklamation ethischer Standards allein nicht genügt. Zu den nationalsozialistischen Verbrechen ist es trotz sehr klarer Anweisungen der preußischen (1900) und der deutschen (1931) Regierung gekommen [33]. Und auch nach dem Nürnberger Kodex von 1947 sind schwer-

wiegend unethische Forschungsprojekte durchgeführt und publiziert worden [z. B. 34, 35]. Deshalb ist eine kontinuierliche Auseinandersetzung mit der zunehmenden Vielfalt schwieriger ethischer Probleme der medizinischen Forschung wie natürlich auch der medizinischen Praxis zwingend. Schritte in diese Richtung sind die Ethikkommissionen und die öffentliche Diskussion. Wenn es auch zur Institution des Expertengremiums einstweilen keine Alternative zu geben scheint [32], so ist es doch ein wichtiger Schritt, daß diese Experten ihre Argumente in verständlicher und auf die wesentlichen Fragen konzentrierter Form in die öffentliche Diskussion bringen (siehe Stellungnahmen des wissenschaftlichen Beirates der Bundesärztekammer, der Zentralen Kommission zur Wahrung ethischer Grundsätze in der Medizin und ihren Grenzgebieten und der Fachgesellschaften).

5 Zusammenfassung

Das Prinzip Einwilligung nach Aufklärung scheint heute in den meisten Ländern rechtlich geregelt zu sein sowie ethisch wahrgenommen und praktisch als notwendige Voraussetzung für jede medizinische Intervention angewandt zu werden. Begründet ist dies im Respekt vor Würde und Selbstbestimmung als einem menschlichen Grundrecht, selbst zu entscheiden, was im eigenen besten Interesse liegt. Dieses Prinzip hat sich besonders im Hinblick auf die medizinische Forschung entwickelt, weil Forschung primär auf eine wissenschaftlich geprüfte Verbesserung des Wissens zielt, also auf einen Nutzen, der über das Individuum hinausreicht. Deshalb erscheint Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Personen als ethisch vertretbar und rechtlich zulässig, wenn die teilnehmende Person einen individuellen Nutzen erwarten kann und spezifische Schutzbedingungen, wie der Ersatz der Einwilligung nach Aufklärung durch einen gesetzlichen Vertreter oder Betreuer, erfüllt sind.

Ein schwieriges und kontrovers beurteiltes Problem bleibt medizinische Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Patienten, die nur einen fraglichen oder keinen individuellen Nutzen erwarten läßt (und oft unzutreffenderweise mit nicht-therapeutischer Forschung gleichgesetzt wird). Dies spiegelt sich in der Tatsache wider, daß solche Forschung unter bestimmten Bedingungen in einigen Ländern, wie Frankreich und wohl auch in England, rechtlich zulässig ist, in anderen Ländern, wie Deutschland, jedoch nicht (oder rechtlich ungeklärt ist). Aus ärztlicher Sicht kann solche Forschung ethisch nur vertreten werden, wenn ihre Notwendigkeit nach bestimmten Kriterien festgestellt ist und definierte Schutzkriterien erfüllt sind, welche sicherstellen, daß die Forschung mit nicht mehr als minimalen Risiken und vernachlässigbaren Unannehmlichkeiten für die teilnehmende Person verbunden

ist und deren Ablehnung akzeptiert wird. Hinsichtlich dieser Kriterien besteht eine große internationale Übereinstimmung [36, 37, 20]. Zudem müssen Konzepte und Definitionen von Nutzen und – insbesondere minimalen! – Risiken, weiter von Kriterien, Regeln und Verfahren für die Abwägung von Nutzen und Risiken gegeneinander und nicht zuletzt für die Gewichtung individuellen gegenüber gesellschaftlichen Nutzens ausgearbeitet werden. Auch die Frage, wer diese Gewichtungen vornimmt, bedarf einer befriedigenden Antwort.

Die Diskussion um sogenannte nicht-therapeutische Forschung mit nicht-einwilligungsfähigen Personen verstärkt Befürchtungen gegenüber einer medizinischen Wissenschaft mit inhumanen Zügen. Weil diese Forschung mehr als andere medizinische Interventionen das Risiko einer Instrumentalisierung des Menschen enthält, berührt sie zutiefst das menschliche Grundrecht auf Anerkennung der persönlichen Würde. Deshalb ist eine öffentliche Diskussion darüber erforderlich. Und dies nicht nur, weil Respekt für die menschliche Würde an Offenheit und Bemühung um Verständnis des anderen gebunden ist, sondern auch weil in einer offenen Gesellschaft das Verständnis der in ihr vertretenen Meinungen eine Voraussetzung für die gesellschaftlich berufenen Entscheidungsträger ist, die Rahmenbedingungen für solche Forschung festzulegen. In dieser Diskussion sollten z. B. die Philosophen das Verhältnis utilitaristischer zu deontologischer Ethik und deren praktische Bedeutung erläutern, während medizinische Forscher die schwierige Aufgabe haben, den individuellen wie gesellschaftlichen Bedarf solcher Forschung und ihrer Konsequenzen mit spezifischen Beispielen und die differenzierte Wirklichkeit von Nutzen, Risiken, Belastungen sowie der ethischen Rechtfertigung dieser Forschung überzeugend klar zu machen.

Obwohl es verständlich ist, daß Menschen in einer sich rasch ändernden Welt mehr denn je offensichtlich klare Prinzipien undiskutiert eingehalten wissen wollen, ist die Frage nach den empirischen Konsequenzen dieser Prinzipien doch ernst, besonders im Hinblick auf eine menschliche und erfolgreiche Anpassung an diese Veränderungen. Deshalb müssen die Lasten einer solchen sorgfältigen öffentlichen Diskussion wohl getragen werden.

Literatur

- 1 Klinkhammer, G.: Bericht über die 14. Jahresversammlung des Arbeitskreises Medizinischer Ethikkommissionen in der Bundesrepublik Deutschland. In: Dt. Ärztebl., 93 (1996), B-2463.
- 2 Zentrale Ethikkommission: Stellungnahme „Zum Schutz nicht-einwilligungsfähiger Personen in der medizinischen Forschung“. In: Dt. Ärztebl., 94 (1997), A1011-1012, B811-B812.

- 3 Bockenheimer-Lucius, G.: Die „Bioethik-Konvention“ – Entwicklung und gegenwärtiger Stand der Kontroverse. In: *Ethik Med.*, 7 (1995), S. 146-153.
- 4 de Wachter, A. M.: The European Convention on Bioethics. In: *Hastings Center Report* 27, no. 1 (1997), S. 13-23.
- 5 Roscam Abbing, H. D. C.: Medical research involving incapacitated persons; what is legally permissible? Institute for Private Law, Department of Health Law, Faculty of Law, University of Utrecht, 1994.
- 6 Stein, R.: Mißbrauch der Medizin. Bericht über den Kongreß „Medizin und Gewissen“ in Nürnberg vom 25.-27.10.1996. In: *Berliner Ärzte*, 12/96, S. 29-31.
- 7 Klee, E.: „Euthanasie“ im NS-Staat: Die „Vernichtung lebensunwerten Lebens“, Frankfurt/Main: Fischer, 1983.
- 8 Mitscherlich, A. & F. Mielke: *Medizin ohne Menschlichkeit. Dokumente des Nürnberger Ärzteprozesses*, Frankfurt/Main: Fischer, 1960.
- 9 Beauchamp, T. L. & J. F. Childress: *Principles of Biomedical Ethics*, 3rd ed., New York, Oxford: Oxford University Press, 1989.
- 10 Meijers, L. C. M. et al.: Committee „Medical Experiments With Incapacitated Persons“ to the Ministry for Health, Welfare, and Sport and the Ministry of Justice. Den Haag, 1995.
- 11 Helmchen, H. & H. Lauter (Hg.): *Dürfen Ärzte mit Demenzkranken forschen?*, Stuttgart: Thieme, 1995.
- 12 *Nürnberger Kodex*. In: Helmchen, H. & B. Müller-Oerlinghausen (Hg.), *Psychiatrische Therapie-Forschung. Ethische und juristische Probleme*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1978.
- 13 United Nations Organization. *International Covenant on Civil and Political Rights*. Adopted by the United Nations General Assembly in 1966 and entered into force in 1976, New York: United Nations, 1976.
- 14 World Medical Association. *Declaration of Helsinki*. Adopted by the 18th World Medical Assembly, Helsinki 1964, ammended by the 29th World Medical Assembly, Tokyo 1975, 35th World Medical Assembly, Venice 1983, and the 41st World Medical Assembly, Hong Kong: World Medical Association, 1989.
- 15 Ärztekammer Berlin. *Berufsordnung. Amtsblatt für Berlin*: 14. September 1990, S. 1884.
- 16 CIOMS/WHO: *International Ethical Guidelines for Biomedical Research Involving Human Subjects*. Prepared by the Council for International Organisations of Medical Sciences (CIOMS), Geneva, 1993.
- 17 Helmchen, H.: Ziele. Beratungsgegenstände und Verfahrensweisen medizinischer Ethikkommissionen. In: *Ethik Med.*, 7 (1995), S. 58-70.
- 18 Fagot-Largeaut, A.: National Report France. In: Koch, H. G., Reiter-Theil, S. & H. Helmchen (ed.), *Informed Consent in Psychiatry*, Baden-Baden: Nomos, 1996, S. 67-96.
- 19 The Law Commission: *Mentally incapacitated adults and decision making: medical treatment and research*, a consultation paper no. 129, London: HMSO, 1993.
- 20 The Law Commission: *Mental incapacity: HC Paper 189*, London: HMSO 1995. Abridged version of the summary. *Bull. Med. Eth.*, March 1995, S. 13-18.

- 21 Parfit, D.: *Reasons and Persons*, Oxford: Clarendon Press, 1984.
- 22 Veatch, R. M.: *Abandoning Informed Consent*. In: *Hastings Center Report*, 25 no. 2 (1995), S. 5-12.
- 23 Fuchs, U.: *Stellungnahme zum Entwurf einer Bioethik-Konvention des Europarates*. Deutscher Bundestag, Rechtsausschuß: Zusammenstellung der Stellungnahmen zur gemeinsamen Anhörung des Rechtsausschusses, des Ausschusses für Gesundheit und des Ausschusses für Bildung, Wissenschaft, Forschung, Technologie und Technikfolgenabschätzung, 17. Mai 1995.
- 24 Paul, J.: *Stellungnahme zum Entwurf einer Bioethik-Konvention des Europarates*: Deutscher Bundestag, Rechtsausschuß. Zusammenstellung der Stellungnahmen zur gemeinsamen Anhörung des Rechtsausschusses, des Ausschusses für Gesundheit und des Ausschusses für Bildung, Wissenschaft, Forschung, Technologie und Technikfolgenabschätzung, 17. Mai 1995.
- 25 Amelung, K.: *National Report Germany*. In: Koch, H. G., Reiter-Theil, S. & H. Helmchen (ed.), *Informed Consent in Psychiatry*, Baden-Baden: Nomos, 1996, S. 97-128.
- 26 Rosenberg, R.: *National Report Denmark*. In: Koch, H. G., Reiter-Theil, S. & H. Helmchen (ed.), *Informed Consent in Psychiatry*, Baden-Baden: Nomos, 1996, S. 3-28.
- 27 Casey, P. R.: *National Report Ireland*. In: Koch, H. G., Reiter-Theil, S. & H. Helmchen (ed.), *Informed Consent in Psychiatry*, Baden-Baden: Nomos, 1996, S. 151-169.
- 28 Berghmans, R. L. P.: *Research with decisionally incapacitated subjects: the status quo and debate in the Netherlands*. Institute for Bioethics, Maastricht, NL, 1995.
- 29 Dörner, K.: *Tödliches Mitleid. Zur Frage der Unerträglichkeit des Lebens oder: die Soziale Frage: Entstehung, Medizinisierung, NS-Lösung, heute, morgen*, Gütersloh: Verlag Jakob van Hoddis, 1988.
- 30 Binding, K. & A. Hoche: *Die Freigabe der Vernichtung lebensunwerten Lebens, ihr Maß und ihre Form*, Leipzig, 1920.
- 31 Levine, R. J.: *Proposed Regulation for Research Involving Those Institutionalized as Mentally Infirm: A Consideration of Their Relevance in 1996*. In: *IRB*, 18, 5 (1996), S. 1-5.
- 32 Rössler, D.: *Zur Diskussion über die Bioethik-Konvention*. In: *Ethik Med.*, 8 (1996), S. 167-172.
- 33 Vollmann, J. & R. Winau: *Informed consent in human experimentation before the Nuremberg code*. In: *Br. Med. J.*, 313 (1996) S. 1445-1447.
- 34 Beecher, K. K.: *Ethics and clinical research*. In: *New Engl. J. Med.*, 274 (1966), S. 1354-1360.
- 35 Faden, R. (ed.): *The human radiation experiments*, New York: Oxford University Press, 1996.
- 36 Dresser, R.: *Mentally Disabled Research Subjects. The Enduring Policy Issues*. In: *J. Am. Med. Assoc.*, 276 (1996) S. 67-72.

- 37 Keyserlingk, E. W., Glass, K., Kogan, S., Gauthier, S.: Proposed Guidelines for the Participation of Persons with Dementia as Research Subjects. In: *Persp. Biol. Med.* 38 (1995) 2, S. 319-361.

Helga Haftendorn

Wasser als Problem der internationalen Politik

(Vortrag vor den Mitgliedern der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften am 12. Dezember 1997)

1 Das Problem

„Das Beste aber ist das Wasser.“ Mit diesem Wort von Pindar aus den olympischen Oden möchte ich meinen Vortrag beginnen.

Wasser ist die Grundlage menschlichen Lebens und menschlicher Kultur

Ohne Wasser ist menschliches Leben nicht möglich, aber nur ein ganz kleiner Teil des Wassers auf dem „blauen Planeten“ kann vom Menschen genutzt werden (vgl. Abb. 1).

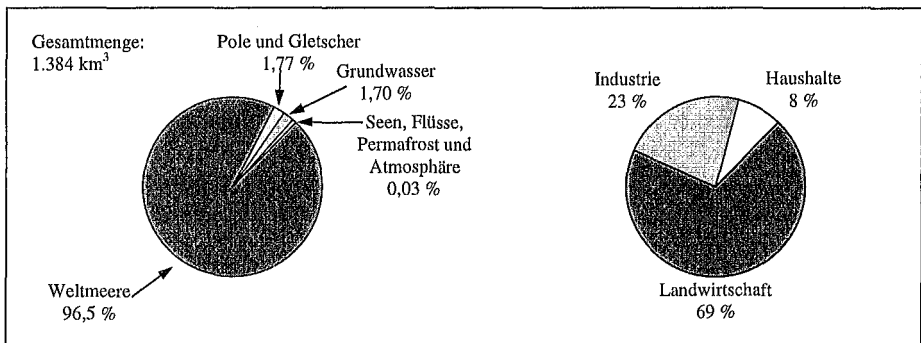


Abb. 1
Wassermenge der Erde und deren Nutzung

Die Geschichte lehrt uns, daß sich Hochkulturen in der Regel an Flußläufen entwickelt haben, so z. B. Mesopotamien, Indus, Ägypten.

Auf die Bedeutung des Nils verweisen zahlreiche pharaonische Inschriften, wie auch diejenige im Grabmal von Ramses III. im Tal der Könige:

„Nie habe ich Nilwasser zurückgehalten,
nie habe ich dem Wasser den Weg versperrt,
nie habe ich den Nil verschmutzt.“

Der Entwicklung der Seefahrt verdanken viele Mächte ihre dominierende Position, nämlich durch die Beherrschung der Meere. Beispiele sind:

- im Altertum Athen und später der Attische Seebund, der den Athenern die Beherrschung des Ionischen Meeres erlaubte;
- in der beginnenden Neuzeit Portugal, Spanien und die Niederlande, deren Reichtum sich auf die Gründung von Kolonialreichen stützte;
- im 19. und beginnenden 20. Jahrhundert Großbritannien: („Britannia rules the waves“);
- in der Gegenwart die USA, deren überseeische Stützpunkte und Machtprojektion im Sinne von Eingreifbarkeit konstituierendes Merkmal ihrer Weltmachtrolle sind.

Wasser ist eine endliche und knappe Ressource

Bislang verfügt die Menschheit über *ausreichende Süßwasserressourcen*. Das Problem besteht jedoch darin, daß diese *außerordentlich ungleich verteilt* sind.¹ Diese Ungleichheit wird in den nächsten 25 Jahren als Folge des Bevölkerungswachstums und des wachsenden Lebensstandards, der landwirtschaftlichen Entwicklung („grüne Revolution“) und der zunehmenden Industrialisierung noch

¹ Turkmenistan, Ägypten, Mauretanien und Ungarn sind zu über 95 % ihres Wasserbedarfs von exogenen Ressourcen abhängig, weitere 14 Staaten zu 75 %. Vgl. Peter Wallenstein und Ashok Swain, *International Fresh Water Resources: Conflict or Cooperation?* Stockholm: Stockholm Environment Institute 1997, S. 11 (*Comprehensive Assessment of Freshwater Resources of the World*); ferner Günther Bächler, Volker Böge, Stefan Klötzli, Stephan Libiszewski, Kurt R. Spillmann, *Kriegsursache Umweltzerstörung. Ökologische Konflikte in der Dritten Welt und Wege ihrer friedlichen Bearbeitung*. Zürich: Rütegger 1996, Bd. I, S. 123.

zunehmen.² Die höchsten Zuwachsraten dürften Asien, insbesondere Süd- und Südostasien, sowie große Teile Afrikas zu verzeichnen haben – jene Landstriche, die schon jetzt unter relativer Wasserknappheit zu leiden haben.³

Lassen Sie mich ein Beispiel für eine große Wasserknappheit bei gleichzeitig ungleicher Verteilung geben: Das *Wasser des Jordan* und seiner Nebenflüsse ist die wichtigste Ressource für die Bevölkerung und Wirtschaft Israels, des Palästinensischen Autonomiegebietes und Jordaniens; es deckt jedoch weniger als 50 % des Bedarfs für Landwirtschaft, Industrie und Haushalte. Das Wasser im Jordanbecken ist zugleich extrem ungleich verteilt. Pro Jahr und Kopf entfallen auf Israel 370 m³, auf Jordanien 220 m³ und auf die Palästinenser nur ca. 100 m³ des Jordanwassers. Internationale Experten gehen davon aus, daß 500 m³ das absolute Minimum für eine wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung ist.⁴ In Zukunft könnten jedoch Bevölkerungswachstum, verstärkte Industrialisierung und Verstädterung sowie klimatische Veränderungen in der Region zu noch größerer Knappheit führen.

Ein besonders drastischer Fall der *Übernutzung* einer natürlichen Wasserressource mit katastrophalen Folgen für die Anlieger ist der *Aralsee*, dessen Wasserfläche als Folge der Ableitung von Amu Darja und Syr Darja seit 1960 nicht nur um nahezu 56 % zurückgegangen ist, sondern dessen verbleibendes Wasser auch biologisch tot und hochgradig versalzen ist.⁵

² Zwischen 1940 und 1990 hat sich die Weltbevölkerung etwas mehr als verdoppelt, der Wasserverbrauch jedoch vervierfacht. Bis zum Jahr 2025 prognostizieren Experten einen Anstieg der Weltbevölkerung auf ca. 8,4 Mrd. Menschen, wobei sich das Wachstum auf die – in der Regel wasserärmeren – Entwicklungsländer konzentrieren dürfte. Bei einem globalen Wirtschaftswachstum von (geschätzt) 2,1 % würde der Wasserverbrauch um 29 % (niedrigste Prognose) bis 59 % (höchste Prognose) auf bis zu 5.500 km³ steigen. Vgl. Paul Raskin u. a., *Water Futures: Assessment of Long-Range Patterns and Problems*. Stockholm: Stockholm Environment Institute 1997 (*Comprehensive Assessment of Freshwater Resources of the World*), S. 21.

³ Vgl. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung: *Globale Umweltveränderungen, Welt im Wandel. Wege zu einem nachhaltigen Umgang mit Süßwasser* (zit. als Jahresgutachten Wasser). Bremerhaven: Geschäftsstelle WBGU am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung 1997, S. 75-88; Paul Raskin u. a., *Water Futures: Assessment of Long-Range Patterns and Problems*, S. 21.

⁴ Angaben nach: Stefan Libiszewski, *Water Disputes in the Jordan Basin and their Role in the Resolution of the Arab-Israeli Conflict*, in: Günther Bächler und Kurt R. Spillmann (Hg.), *Kriegsursache Umweltzerstörung*. Chur und Zürich 1996, Bd. II: *Regional- und Länderstudien*, S. 337-460 (S. 366).

⁵ Vgl. Stefan Klötzli, *The Water and Soil Crisis in Central Asia – A Source for Future Conflicts?*, in: G. Bächler u. K. R. Spillmann, *Kriegsursache Umweltzerstörung*, Bd. II, S. 247-335 (S. 261); ferner Michael Martens, *Die Hoffnung stirbt zuletzt. Hafenstädte*

Ein weiteres Problem ist die *Reinhaltung der Wasserressourcen*. So ist der Rhein vor nicht allzu langer Zeit, ehe die verschiedenen Maßnahmen zur Einleitung von Schadstoffen griffen, häufig als die „Kloake Europas“ bezeichnet worden. Ein aufwendiges „Aktionsprogramm Rhein“ war erforderlich, um die Schadstofffracht auf einigermmaßen akzeptable Werte zu begrenzen.

Wasser ist eine geteilte und eine gemeinsame Ressource

Über 200 Flüsse der Welt sind *internationale Gewässer*; über 50 Flüsse mit einem Einzugsgebiet von mehr als 100.000 km² sowie viele der großen Seen haben *zwei oder mehr Anlieger*. Prominente Beispiele sind der Ganges und der Mekong mit sechs, der Rhein, der Amazonas und der Sambesi mit sieben, der Niger und der Kongo mit neun sowie der Nil und die Donau mit jeweils zehn Anliegerstaaten.⁶ Schon allein diese Tatsache läßt *Konflikte zwischen den Anliegern* über eine angemessene Nutzung wahrscheinlich erscheinen. Während die Hohe See seit dem 17. Jahrhundert (Hugo Grotius, „De Mare Liberum“, 1609, hervorgegangen aus der seinerzeit nicht veröffentlichten Schrift „De iure praedae“) als von allen Staaten zu nutzendes gemeinsames Gut (als „Allmende“) betrachtet wird, gilt für Flüsse und Seen das *Prinzip der nationalen Souveränität*. Es bedarf daher zwischenstaatlicher Vereinbarungen und Verträge, um einen Ausgleich oft widerstreitender Interessen, z. B. zwischen Oberlauf- und Unterlaufanliegern, zu ermöglichen. Dabei setzte sich nur allmählich das Prinzip durch, daß grenzüberschreitende Wasserläufe nicht der alleinigen Verfügung des jeweiligen Anliegerstaates unterstehen (wie es noch 1898 der Generalstaatsanwalt der USA, Harmon, im Streit mit Mexiko über das Wasser des Colorado verkündet hatte), sondern daß ihre Nutzung eines Mindestmaßes an internationaler Kooperation bedarf. In der Gegenwart kommt vor allem der angemessenen Verteilung („*equitable distribution*“) und der Erhaltung, Entwicklung und Reinhaltung von Süßwasserressourcen („*sustainable development*“) große Bedeutung zu.

Die verschiedenen Wasserverträge sind ein getreues Abbild der sich *verändernden Nutzung von Flüssen und Seen*. Die ältesten Regelungen betrafen die *Schifffahrt* und sollten einen möglichst unbehinderten *Handel* gewährleisten. In der Schluß-

in der Wüste: Seit der Aralsee die Baumwollplantagen Zentralasiens bewässert, ist nur noch die Hälfte von ihm übrig, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 13.11.1997, S. R 3.

⁶ Vgl. Jörg Barandat, Wasser als bisher weltweit unterbewerteter Rohstoff, in: ders. (Hg.), Wasser – Konfrontation oder Kooperation. Ökologische Aspekte von Sicherheit am Beispiel eines weltweit begehrten Rohstoffs. Baden-Baden: Nomos, 1997, S. 10-23 (S. 12).

akte des Wiener Kongresses von 1815 wurden Maas, Main, Mosel, Neckar, Rhein und Schelde zu internationalen Strömen („*international watercourses*“) erklärt, die allen Staaten unter gleichen Bedingungen zur Schifffahrt und zum Handel offenstehen sollten. Als Anfang des 20. Jahrhunderts die *industrielle Nutzung* der Fließgewässer an Bedeutung zunahm, standen Regelungen für den Staudamm- und Kraftwerksbau sowie für die Ab- und Einleitung von Brauchwasser im Vordergrund. Erst in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts wurde im Rahmen des Völkerbundes und in den Vereinten Nationen der Versuch unternommen, *allgemein verbindliche Regeln* für die Nutzung von internationalen Flußsystemen zu entwickeln. Die im Frühjahr 1997 verabschiedete *UN-Wasser-Konvention*⁷ bietet jedoch nur einen allgemeinen Rahmen, der viel Spielraum für unterschiedliche Auslegungen läßt, abgesehen davon, daß ihr möglicherweise nicht alle „kritischen“ Staaten (d. h. solche mit akuten Wasserkonflikten, wie z. B. die Türkei und China) beitreten werden.

Fragestellung

Im folgenden werde ich mich mit der Frage beschäftigen, *aus welchen Gründen und unter welchen Bedingungen es zu internationalen Konflikten*⁸ *über die Nutzung von Süßwasserressourcen kommt*, seien es Flüsse, Seen oder Grundwasserspeicher (sogen. „Aquifer“). Allerdings kann dies im Rahmen eines Vortrages nur exemplarisch geschehen. Die zweite Frage zielt darauf ab, in welchem *Verhältnis Konflikte oder Krisen um Wasser zu anderen Konflikten* stehen. Sind Ressourcenkonflikte die Ursache internationaler Konflikte, oder tragen sie dazu bei, vorhandene, aus anderen Gründen entstandene Konflikte (z. B. ethnische Konflikte) zu verschärfen und ihre Lösung zu erschweren? Schließlich werde ich untersuchen, welche *Regelungsmechanismen und Lösungsansätze* sich in der Vergangenheit bewährt haben und welche sich in der Zukunft als erfolgversprechend erweisen könnten.

Auf die Frage nach internationalen Konflikten über die Nutzung von *Küstengewässern, Meerengen* und die *Hohe See* kann ich leider aus Zeitgründen nicht eingehen.

⁷ Vgl. United Nations Convention on the Law of the Non-Navigational Uses of International Watercourses. Doc. A/51/869, April 11, 1997; vgl. ferner Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes („Helsinki Convention“), E-ECE/1267, March 17, 1992.

⁸ Innerstaatliche Konflikte bleiben – trotz der Tatsache, daß sie häufig grenzüberschreitende Wirkungen haben – ausgeklammert.

Da es bisher nur in Einzelfällen zu zwischenstaatlichen militärischen Auseinandersetzungen über die Nutzung von Wasser – vor allem im Nahen Osten – gekommen ist, sollte besser von „Wasserkrisen“ als von Wasserkonflikten gesprochen werden. In der Literatur hat sich jedoch in dem Bemühen, der vernachlässigten Ressource Wasser eine erhöhte Aufmerksamkeit zuteil werden zu lassen, der Begriff „Wasserkonflikt“ eingebürgert, so daß auch ich diesen Begriff benutze, anstatt korrekt von „Wasserkrisen“ zu sprechen.⁹

2 Probleme des internationalen Süßwassermanagements

Schifffahrt und Nutzung der Wasserkraft

a) Regelung der Flußschifffahrt

Ich habe darauf verwiesen, daß die ältesten Regelungen für die grenzüberschreitende Nutzung von Flüssen die Schifffahrt betrafen. Heute verfügt die Staatenwelt über ein dichtes Netz von zwei- und mehrseitigen Verträgen, auf deren Grundlage der Verkehr auf den internationalen Wasserstraßen in Friedenszeiten weitgehend problemlos abläuft. Auftretende Probleme können in vielen Fällen von internationalen Schifffahrtskommissionen, wie z. B. der seit 1815 bestehenden Rheinschifffahrtskommission, geklärt werden.

b) Konflikte zwischen Ober- und Unterliegern beim Kraftwerksbau

Zu Konflikten kommt es jedoch häufig, wenn ein Staat daran geht, einen Fluß an seinem Oberlauf zu stauen und ein Kraftwerk zu errichten. Ein Beispiel, das die internationale Staatengemeinschaft nachhaltig beschäftigt hat, sind die Staudammprojekte am Paraná, der den Grenzfluß zwischen Paraguay und Brasilien sowie zwischen Paraguay und Argentinien bildet, ehe er sich zusammen mit dem Uruguay in das La Plata-Becken entleert. Insbesondere ist der Plan eines brasilianisch-paraguayischen Staudammprojektes zur Stromgewinnung bei Itaipu von Argentinien wegen seiner gefürchteten Auswirkungen im Unterlauf des Flusses kritisiert worden. Obwohl die fünf sogenannten La Plata-Staaten – Argentinien, Bolivien, Brasilien, Paraguay und Uruguay – bereits 1969 einen Vertrag über die wirtschaftliche Integration und gemeinsame Entwicklung des La Plata-Beckens geschlossen

⁹ Einige Autoren, wie z. B. Ulrich Albrecht, *Krieg um Wasser?*, in: *Prokla*, 26. Jg. Nr. 1 (H. 102), S. 5-16, sprechen mit primärem Bezug auf internationale Konflikte sogar von „Krieg um Wasser“, eine Diktion, die sich sonst vor allem in populärwissenschaftlichen Darstellungen findet.

haben, kam es immer wieder zu Konflikten zwischen den Anliegern. Diese wurden allerdings ausschließlich mit Mitteln der Diplomatie ausgetragen, die von wirtschaftlichen Gegenmaßnahmen, dem Werben um Paraguay bis hin zu Plänen für konkurrierende Kraftwerksprojekte am Paraná reichten. Während Brasilien und Paraguay auf ihre nationale Verfügungsgewalt über den Paraná pochten, versuchte Argentinien, seinem Anspruch auf ausreichende Information und Konsultation durch die Einbringung entsprechender Resolutionen in die Vollversammlung der Vereinten Nationen Nachdruck zu verschaffen.¹⁰ 1979 konnte dieser Konflikt im Rahmen des Mercosul beigelegt werden. Gegenwärtig droht jedoch in der Region ein weiterer Konflikt. Ein neues Konfliktpotential entsteht mit der Verwirklichung des „Hidrovia-Projektes“, in dessen Rahmen der Paraguay auf 3.400 km Länge zu einer internationalen Wasserstraße ausgebaut werden soll.¹¹

Auch im Donaauraum belastete ein großes Kraftwerkprojekt in den letzten Jahren die Beziehungen der Anliegerstaaten, und zwar zwischen der Slowakei, Ungarn und Österreich.

Bei der Auseinandersetzung über den 1977 vereinbarten Bau eines ungarisch-tschechoslowakischen Staudammprojektes bei Gabčíkovo-Nagymaros ging es um den Vorrang wirtschaftlicher oder ökologischer Interessen. Aus Angst vor schwerwiegenden Umweltschäden im Donaauraum (und in Reaktion auf entsprechenden innenpolitischen Druck) hatte Ungarn 1992 nach dem Scheitern mehrjähriger Verhandlungen den Vertrag gekündigt. Die österreichischen Banken und Unternehmen, welche am Bau beteiligt waren, erhielten Ausgleichszahlungen von der ungarischen Regierung. Die Slowakei führte jedoch die Arbeiten fort und baute einen Seitenkanal, mit dem ungarisches Gebiet umgangen werden konnte. 1992 begann die Slowakei mit der Stromerzeugung in Gabčíkovo, wenn auch in geringerem Umfang als ursprünglich geplant. Als Folge der Donaumleitung machte darauf Ungarn schwere Umweltschäden geltend. Erneute Verhandlungen zwischen den beiden Ländern (zum Teil unter Einschaltung der EU) führten nicht zu einer Einigung, so daß beide Regierungen den Internationalen Gerichtshof in Den Haag anriefen. Das Gericht befand im September 1997, daß beide Seiten ihre vertraglichen Verpflichtungen verletzt hätten. Weder hätte Ungarn den Vertrag einseitig aufkündigen noch die Slowakei ebenso einseitig die Donau auf ihr Staatsgebiet umlenken dürfen. Der IGH forderte beide Seiten auf, in Verhandlungen eine

¹⁰ Vgl. Friedrich August Freiherr von der Heydte, Der Parana-Fall: Probleme der gemeinsamen Nutzung der Wasserkraft eines internationalen Stroms, in: Dieter Blumenwitz und Albrecht Randelzhofer (Hg.), Festschrift für Friedrich Berber zum 75. Geburtstag. München: Beck, 1973, S. 207-216; Edward S. Milenky, Argentina's Foreign Policies. Boulder, CO: Westview, 1978, S. 186-189.

¹¹ Vgl. Das Pantanal – eines der größten Feuchtgebiete der Welt – ist gefährdet, in: Jahresgutachten Wasser, S. 274-275.

Lösung für die entstandenen Probleme zu finden. Wenn keine andere Lösung gefunden wird, so soll der auf slowakischem Gebiet befindliche Damm in Übereinstimmung mit der Abrede von 1977 unter ein gemeinsames Regime gestellt werden.¹²

c) Ausdehnung der Regelung auf ein ganzes Gewässersystem

Die Fortschritte in der Hydrotechnik machten nach dem Ende des Zweiten Weltkrieges Regelungen erforderlich, in die Quellflüsse ebenso wie unterirdische Wasserreservoirs einbezogen werden konnten. Der Gedanke der hydrographischen Kohärenz eines Gewässers einschließlich seiner Grundwasserströme („*international drainage basin*“) bildete daher das Leitprinzip der von der International Law Association 1966 verabschiedeten „Helsinki Rules on the Uses of Waters of International Rivers“.¹³ Ihren Niederschlag fanden diese Prinzipien in dem im April 1966 zwischen der Bundesrepublik, Österreich und der Schweiz abgeschlossenen Abkommen über die Wasserentnahme aus dem Bodensee, in dem sich die Vertragsstaaten verpflichteten, bei künftigen Wasserentnahmen die berechtigten Interessen der anderen Anliegerstaaten nicht übermäßig zu beeinträchtigen.¹⁴ Wie wichtig eine Zusammenarbeit an internationalen Flußsystemen ist, die das gesamte Einzugsgebiet umfaßt – bzw. welche katastrophalen Folgen das Fehlen einer Kooperation zeitigen kann –, haben die Überschwemmungen des Jahres 1997 in der Oderregion gezeigt.

¹² Vgl. Joanne Linneroth, *The Danube River Basin: Negotiating Settlements to Transboundary Environmental Issues*, in: *National Resources Journal*, Bd. 30, Sommer 1990, S. 629-660; Judit Galambos, *An International Environmental Conflict on the Danube: The Gabčíkovo-Nagymaros Dams*, in: Anna Vari und Pal Tamas (Hg.), *Environment and Democratic Transition. Policy and Politics in Central and Eastern Europe*. Dordrecht, Bosaton u. a.: Kluwer, 1993, S. 176-226. Zum Spruch des IGH vom 25.9.1997 vgl. Urteil im Streit um Donaukraftwerk. Haager Gerichtshof rügt Rechtsverstöße Ungarns und der Slowakei, in: *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 26.9.1997.

¹³ Vgl. International Law Association, *The Helsinki Rules on the Uses of the Waters of International Rivers*. Helsinki, August 1966, in: *Resolutions Adopted by Governments, International Legal Institutions and International Organizations, on the Management of International Water Resources*, zusammengestellt von Dante A. Caponera. Rom: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1980 (zit. als *Resolutions on the Management of International Water Resources*), S. 293-299.

¹⁴ Vgl. Alfred Verdross und Bruno Simma, *Universelles Völkerrecht. Theorie und Praxis*. Berlin: Duncker & Humblot, 1984³, S. 642f. Zum internationalen Wasserrecht, insbes. seiner historischen Entwicklung, vgl. *Resolutions on the Management of International Water Resources*, S. 4f.; ferner Hans-Joachim Heintze, *Wasser und Völkerrecht*, in: Barandat, *Wasser – Konflikt oder Kooperation*, S. 279-297.

Bereits 1995 wurde in der Oderregion ein Projekt zum grenzüberschreitenden Umwelt- und Katastrophenschutz entwickelt und von den Verantwortlichen für die Euroregion „Pro Europa Viadrina“ als besonders förderungswürdig eingestuft. Bis zur Katastrophe in diesem Sommer hatten zwar der Landkreis Märkisch-Oderland und die Woiwodschaft Gorzow EU-Mittel zur Erstellung einer Gefahrenkarte und zur Entwicklung eines einheitlichen Meldesystem erhalten, das geplante deutsch-polnische Abkommen zum Katastrophenschutz war jedoch noch nicht unterzeichnet worden. Die Rettungsaktionen wurden durch den unzulänglichen Informationsaustausch und die Inkompatibilität des technischen Geräts erheblich behindert. Erst als Folge der Krise wurden in der Oderregion die Anstrengungen intensiviert, die grenzüberschreitende Zusammenarbeit unter Einbeziehung weiterer polnischer und vor allem auch tschechischer Landkreise zu verbessern. Gegenwärtig wird über ein deutsch-polnisch-tschechisches Projekt zur Entwicklung des Oder-Raumes diskutiert, mit dessen Hilfe künftig Naturkatastrophen in dem hochwassergefährdeten Gebiet verhindert werden sollen.¹⁵

Wasserreinhaltung

Außer zur Schifffahrt und zur Stromerzeugung werden Flüsse und Seen zunehmend auch industriell genutzt. Sie dienen nicht nur als Reservoir für die Entnahme von Brauch- und Kühlwasser, sondern werden auch zur Entsorgung von Abwässern und Industrieabfällen verwandt. Mit dem Sinken der Wasserqualität der industriell genutzten grenzüberschreitenden Flüsse und Seen erhält das Problem der Wasserreinhaltung eine internationale Dimension. Besonders gut kann dies am Beispiel des Rheins gezeigt werden, da sein Einzugsgebiet zu den bevölkerungsreichsten und am meisten industrialisierten Gebieten Europas gehört.

a) Das Rheinbecken

Besonders ausgeprägt sind am Rhein die Interessenunterschiede zwischen Oberlieger- und Unterliegerstaaten, die ihre Ursache in unterschiedlichen Nutzungen des Rheinwassers haben. Zu den Hauptverschmutzern gehören die chemische Industrie in den Oberliegerstaaten Schweiz und Deutschland, ferner die französischen Kaliminen im Elsaß sowie deutsche Kohlebergwerke an Ruhr und Lippe. Der Rhein wird durch ihre Emissionen mit großen Mengen an Chemieabfällen,

¹⁵ Vgl. EUROREPORT der Euroregion Pro Europa Viadrina, Nr. 2/1996; Projekt Nummer eins gegen die Flut, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 30.7.1997; Gemeinsamer Plan gegen Flutgefahren, in: Tagesspiegel, 1.8.1997; Kinkel für „Oder-Projekt“, in: Tagesspiegel, 7.8.1997.

Salzen und Schwermetallen belastet. Die Folgen haben die Niederlande als Unterliegerstaat zu tragen, der das Rheinwasser primär für die Trinkwassergewinnung und für die Landwirtschaft (insbes. den Gartenbau) nutzt. Durch die toxische Belastung des Rheinschlammes steigen auch die Kosten für die Stadt Rotterdam, die den Schlick des Rotterdamer Hafens nicht mehr als Füllmaterial benutzen oder in der Nordsee verklappen kann, sondern auf Sondermülldeponien entsorgen muß. Während durch die Rheinschiffahrt verursachte Verunreinigungen des Flusses schon seit der Jahrhundertwende in der internationalen Rheinschiffahrtskommission diskutiert und weitgehend geregelt wurden, verhinderten die Interessenunterschiede zwischen Oberlieger- und Unterliegerstaaten eine rasche Lösung des Verschmutzungsproblems. Zunächst wurde 1950 von den Anliegerstaaten die Internationale Kommission zum Schutz des Rheins vor Verunreinigung gegründet. 1963 wurde ihr in der Berner Konvention die Aufgabe zugewiesen, das Ausmaß und die Quellen der Verschmutzung des Rheins zu überwachen und zu erforschen, Maßnahmen zum Schutz des Flusses vorzuschlagen und Abkommen zwischen den Anliegerstaaten vorzubereiten. Es waren in der Folge vor allem die Niederlande, die als hauptbetroffener Unterliegerstaat immer wieder die Initiative ergriffen und Maßnahmen zur Reinhaltung des Rheins anmahnten. 1976 unterzeichneten die Umweltminister der Rheinanlieger zwei Abkommen zum Schutz des Rheins vor chemischer Verschmutzung und zur Verringerung der Salzbelastung des Flusses. Im Chemieabkommen wurde eine schrittweise Reduzierung der toxischen Einleitungen mit Hilfe von schwarzen und grauen Listen vereinbart; im Chloridabkommen verpflichteten sich die Mines de Potasse d'Alsace zur Reduzierung der Einleitung von Kalisalzen. Die Umsetzung dieser Verträge erwies sich jedoch als äußerst schwerfällig. Probleme gab es vor allem bei der Festlegung von Emissionsgrenzwerten, der Abstimmung mit der EU-Kommission und den nationalen Ratifizierungsverfahren.

Das Chloridabkommen trat erst 1987 in Kraft, nachdem die französische Regierung weitreichende Modifikationen erreicht hatte. Da sich Frankreich als Verursacherstaat weigerte, die aus den elsässischen Kalibergwerken herrührende Salzbelastung des Rheins einseitig zu reduzieren, kam es schließlich zu einer Kostenteilung unter den Anliegerstaaten, nach der Frankreich und Deutschland mit je 30 %, Holland mit 34 % und die Schweiz mit 6 % das Programm zur Reduktion der Salzeinleitung finanzieren würden. Als Gegenleistung sagten die Niederlande der Bundesrepublik und der Schweiz zu, daß sie diese nicht wegen den von ihnen ausgehenden, jedoch wesentlich geringeren Salzbelastungen rechtlich belangen würden. Der Abschluß des Chloridabkommens wurde auch wesentlich durch eine Reihe von Initiativen gefördert, die von nationalen Interessengruppen in den Niederlanden ausgingen. So hatten 1974 drei holländische Großgärtnereien und die Stiftung Reinwater die elsässischen Kalibergwerke vor dem Landgericht in Rotter-

dam auf Schadenersatz für Ertragsausfälle durch die Berieselung mit Rheinwasser mit erhöhtem Chloridgehalt und auf Erstattung der Kosten für Vorsorgemaßnahmen verklagt. Nachdem der Europäische Gerichtshof dieses Verfahren für zulässig erklärt hatte, wurden die elsässischen Kaliwerke in mehreren Instanzen zum Schadenersatz verurteilt. Die Stadt Rotterdam setzte in der Hafenfrage ebenfalls auf eine Kombination von Öffentlichkeitsarbeit, eigenen technischen Untersuchungen und vertraulichen Vereinbarungen mit den Punkteinleitern, um diese zur freiwilligen Reduzierung ihrer Schadstoffemissionen zu veranlassen. Zu einer potenten transnationalen Interessengruppe entwickelte sich auch die Internationale Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet, zu der sich die drei großen regionalen Verbände der Wasserwirtschaft 1970 zusammengeschlossen hatten. Diese verhandelten u. a. direkt mit den wichtigsten Einleitern – z. B. dem Deutschen Verband der Chemischen Industrie – und beeinflussten mit ihrer Öffentlichkeitsarbeit nachhaltig die politischen Entscheidungen.

Als Katalysator wirkten auch eine Serie von Chemieunglücken am Rhein im Jahre 1986 (bei Sandoz und Ciba-Geigy in der Schweiz sowie bei BASF, Höchst und Bayer). 1987 verabschiedeten die Anliegerstaaten schließlich ein weitreichendes „Aktionsprogramm Rhein“, mit dem unter dem Stichwort „Lachs 2000“ das Ökosystem des Rheins umfassend saniert werden sollte. Dieses Aktionsprogramm stellt eine freiwillige Verpflichtung ohne rechtliche Bindungswirkung dar. Es wurde erst möglich aufgrund der verschiedenen Abkommen und ihrer erfolgreichen Implementierung.¹⁶ Voraussichtlich wäre es nicht zustande gekommen, wenn nicht einerseits durch die verschiedenen Umweltkatastrophen ein hoher innenpolitischer Druck erzeugt worden und zum anderen durch die intensive Vernetzung zwischen den Anliegerstaaten und die langjährige Praxis ihrer Zusammenarbeit auf einer Vielzahl von Gebieten eine Vertrauensbasis entstanden wäre, welche die Anliegerstaaten zur Übernahme von beträchtlichen Kosten zugunsten der Lebensfähigkeit des gemeinsamen Gutes „Rhein“ bewog.

b) Das Elbebecken

In einem anderen europäischen Flußsystem, der Elbe, wurden durch den Ost-West-Konflikt bis zum Beginn der neunziger Jahre gemeinsame Regelungen zur Reinhaltung des Flusses verhindert. Dafür waren neben dem allgemeinen Systemkon-

¹⁶ Vgl. dazu Rainer Durth, Grenzüberschreitende Umweltprobleme und regionale Integration. Zur Politischen Ökonomie von Oberlauf-Unterlauf-Problemen an internationalen Flüssen. Baden-Baden: Nomos, 1996, S. 168-202; ferner Thomas Bernauer und Peter Moser, Internationale Bemühungen zum Schutz des Rheins, in: Thomas Gehring und Sebastian Oberthür (Hg.), Internationale Umweltregime. Umweltschutz durch Verhandlungen und Verträge. Opladen: Leske + Budrich, 1997, S. 147-163.

flikt noch zwei Gründe maßgeblich. Zum einen war der Verlauf der Elbegrenze zwischen Bundesrepublik und DDR umstritten. Zum anderen hatte in den sozialistischen Staaten die wirtschaftliche Entwicklung absolute Priorität vor der Schonung der Umwelt. Erst 1990 kam es zur Gründung einer Internationalen Kommission zum Schutz der Elbe nach dem Muster der verschiedenen Rheinkommissionen. Die Vorbereitungen dazu wurden von der Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe (ARGE Elbe) geleistet, zu der sich die an der Elbe anliegenden Bundesländer in den siebziger Jahren zusammengeschlossen hatten. 1991 wurde von den Umweltministern der Bundesrepublik und der Tschechoslowakei ein Sofortprogramm für die Elbe verabschiedet, das vor allem eine Verbesserung der Wasserqualität durch den Bau von Kläranlagen für Haushalts- und Industrieabwässer vorsieht.¹⁷

Wasserverteilung

a) Das Euphrat-System¹⁸

Im Gegensatz zu Europa, wo Wasserkonflikte zu Belastungen der zwischenstaatlichen Beziehungen führen können, aber ein gewaltsam ausgetragener Konflikt angesichts der engen Vernetzung der Staaten ausgeschlossen ist, handelt es sich beim Euphratbecken um eine Region, in der ein akuter Verteilungskonflikt über die Ressource Wasser angesichts der in der Region vorhandenen Disparitäten sehr wohl in eine militärische Auseinandersetzung umschlagen könnte.

98 % des Euphratwassers entspringt in der Türkei, die aus geographischen Gründen (Bevölkerungs- und Industriezentren befinden sich im Norden, nicht im Südosten) jedoch nur einen kleineren Teil wirtschaftlich nutzt. Dagegen hängt die Wasserversorgung des Irak zu 98 % von den Flüssen Euphrat und Tigris ab, diejenige Syriens zu 95 % vom Euphrat. Beide Staaten benötigen das Euphratwasser für ihre Bevölkerung, für landwirtschaftliche Bewässerungsprojekte sowie für die Strom-

¹⁷ Vgl. Durth, Grenzüberschreitende Umweltprobleme, S. 204-227.

¹⁸ Vgl. Durth, Grenzüberschreitende Umweltprobleme, S. 228-252; Natasha Beschorner, Water and Instability in the Middle East. Adelphi Paper Nr. 273 (Winter 1972/73). London: Brasseys, 1992, S. 27-45; Hasan Chalabi und Turek Majzoub, Turkey, the Waters of the Euphrates and Public International Law, in: J. A. Allan und Chibli Mallat (Hg.), Water in the Middle East: Legal, Political and Commercial Implications. London und New York, 1995, S. 189-235; Bülent Güven, Die Türkei – eine Republik vor der größten Herausforderung ihrer Geschichte, in: Barandat, Wasser – Konfrontation oder Kooperation, S. 143-156; Jörg Barandat, Die Türkei in der Wasserfalle, ebenda, S. 158-181.

erzeugung. Alle drei Länder haben zu diesem Zweck eine Vielzahl von Staudämmen errichtet. Zwischen ihnen bestehen zudem politische Spannungen, die Ausdruck des Kampfes um regionale Vorherrschaft sind und die Mitte der siebziger Jahre, beim Bau des Assad-Staudammes, bis an den Rand eines militärischen Konfliktes zwischen Syrien und Irak geführt haben. Ein ständiger Konfliktherd zwischen den drei Staaten ist auch das Kurdenproblem.

Eine neue Dimension hat der Konflikt durch das Greater Anatolia Project (GAP) der Türkei erfahren. Dabei handelt es sich um ein gigantisches Entwicklungsprojekt, in dessen Rahmen in Südanatolien 22 Staudämme an Euphrat und Tigris errichtet und 17 Wasserkraftwerke gebaut werden sollen. Die türkische Regierung verfolgt mit diesem Projekt vier Ziele:

1. den Bau umfangreicher Bewässerungsprojekte zur Entwicklung einer exportorientierten Agrarproduktion;¹⁹
2. die Erschließung des Wasserkraftpotentials und die Erhöhung der Kapazitäten zur Stromerzeugung auf 8.000 MW, mit der Möglichkeit eines Stromexports in die Westtürkei und in die Nachbarländer;
3. die industrielle Erschließung der GAP-Region und Verbesserung des Lebensstandards der in der Region ansässigen Bevölkerung (damit auch Befriedung der kurdischen Bevölkerung und „Austrocknung“ der PKK);
4. den Aufbau einer Tourismusindustrie.

Die Realisierung der geplanten Wasserprojekte in der Region führt jedoch zu erheblichen Verteilungskonflikten. Vor allem könnte der Anteil Syriens und des Irak als Unterlieger am Euphrat um jeweils ein Drittel zurückgehen, während die Nutzungsmenge der Türkei von weniger als 10 % auf über 50 % steigen würde. Bei einer Erschließung des Tigris hätte der Irak weitere Rückgänge zu erwarten. Trotz verschiedener Verhandlungsrunden zwischen der Türkei, Syrien und dem Irak ist es bisher nicht zu einer einvernehmlichen Regelung gekommen, obwohl eine solche allen Staaten Vorteile bringen würde. Es gibt zwar ein gemeinsames Technisches Komitee, das nach türkischer Auffassung jedoch nur die Aufgabe hat, Daten auszutauschen und die Nachbarn über bevorstehende Maßnahmen zu informieren. Eine Einigung scheiterte bisher vor allem an den unterschiedlichen Grundannahmen. Während Syrien und der Irak davon ausgehen, daß Euphrat und Tigris internationale Flüsse sind, deren Wasser allen Anliegern gemeinsam zugute kommen müsse, beansprucht die Türkei alle Rechte über das auf ihrem Territorium befindliche Stromsystem. Der türkische Staatspräsident Demirel faßte das in folgende Worte: „Mit dem Wasser ist es wie mit dem Öl. Wer an seiner Quelle

¹⁹ Vgl. Rainer Herrmann, Der lange vernachlässigte Südosten der Türkei beginnt zu grünen. Das Entwicklungsprojekt GAP belebt die Wirtschaft und bricht feudale Strukturen auf, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 21.7.1997, S. 12.

sitzt, hat ein Recht darauf, das ihm niemand streitig machen kann.“²⁰ Für Syrien und den Irak liegen die Vorteile einer Einigung auf der Hand, da sich für sie in jedem Monat der Nichteinigung ihre Wartekosten erhöhen, während die Türkei ihre Position festigen und vollendete Tatsachen schaffen kann. Obwohl sich die Türkei als Oberliegerstaat in einer dominanten Machtposition befindet, würde auch sie von einer Vereinbarung profitieren:

1. Sie könnte eine Deblockierung internationaler Kredite (z. B. bei der Weltbank) erreichen, für die eine Zustimmung der Anliegerstaaten erforderlich ist (bisher wird das Staudammprojekt vor allem von französischen Unternehmen finanziert).
2. Sie könnte landwirtschaftliche Produkte, Strom und Wasser in die Nachbarländer exportieren, was bisher seitens der arabischen Staaten von einem vorherigen Interessenausgleich in der Verteilungsfrage abhängig gemacht wird.
3. Schließlich könnte auch eine Regelung des Kurdenproblems durch eine engere Zusammenarbeit zwischen den drei Staaten erleichtert werden.

Bisher ist es jedoch lediglich zu einigen bilateralen Abmachungen zwischen den drei Staaten gekommen.²¹ So hat die Türkei von den verfügbaren 950 m³/sek. Syrien 1987 vertraglich einen Anteil von 500 m³/sek. am Euphratwasser zugestanden, den Syrien 1990 mit dem Irak im Verhältnis von 290 m³/sek. zu 210 m³/sek. aufgeteilt hat. Syrien und der Irak fordern jedoch insgesamt 700 m³/sek., was den Anteil der Türkei auf 250 m³/sek. (statt 450 m³/sek.) reduzieren würde. Auch hat die Türkei die Vereinbarung von 1987 nicht eingehalten und u. a. mehrfach den Wasserfluß einseitig gedrosselt, um z. B. Syrien zu einer Einstellung der Unterstützung für die PKK zu veranlassen.

Der Wasserkonflikt hat eine nachhaltige Veränderung der regionalen Machtstrukturen zur Folge. Die gemeinsame Frontstellung gegen die Türkei trägt dazu bei, die Gegensätze zwischen Syrien und Irak ebenso wie zwischen ihren ehemals verfeindeten Führern, Hafiz al Assad und Saddam Hussein, zu überbrücken. Umgekehrt intensiviert die türkische Regierung ihre politische, militärische und wirtschaftliche Zusammenarbeit mit Israel. Damit entsteht im Nahen Osten ein neues Parallelogramm der Kräfte.

Eine Einigung in der Wasserfrage dürfte in der Euphratregion nur als Paketlösung möglich sein und müßte folgende Punkte beinhalten:

²⁰ Ste(phan) Li(biszewski), Konfliktstoff Wasser, in: Europäische Sicherheit, Nr. 1, 1996, S. 8.

²¹ Vgl. Aysegül Kibaroglu, Prospects for Cooperation in the Euphrates-Tigris River Basin, in: Turkish Review of Middle East Studies, Jg. 8 (1994–1995), S. 137–155.

1. Einen Modus vivendi für die nicht miteinander zu vereinbarenden rechtlichen Positionen. Das Problem besteht darin, daß die Türkei auf der souveränen Nutzung der auf ihrem Staatsgebiet verfügbaren Wasserressourcen beharrt (und deshalb auch in den Vereinten Nationen gegen die Wasserkonvention von 1997 gestimmt hat, in der eine Berücksichtigung der berechtigten Interessen der anderen Anlieger gefordert wird), während Syrien und der Irak einen gerechten Anteil an diesen fordern.
2. Die Gewährleistung von „Wassersicherheit“ für Syrien und den Irak durch Aufteilung der strittigen 200 m³/sek. des Wasserdurchflusses des Euphratwassers unter die drei Staaten bei gleichzeitiger Garantie seitens der Türkei und Syriens für einen ungehinderten Wasserfluß an den Irak.
3. Als Kompensation das Versprechen Syriens und des Iraks, sich in der Kurdenfrage zurückzuhalten, türkischen Produkten einen erleichterten Marktzugang in den arabischen Staaten sowie Durchgangsrechte für türkische Strom- und Wasserleitungen über ihr Territorium (z. B. für eine „Friedenspipeline“ nach Israel und Saudi-Arabien) zu gewähren.²²

b) Das Jordanbecken

Während der Konflikt im Strombecken von Euphrat und Tigris eine seiner wesentlichen Ursachen in der Verteilung des Wassers der Region hat, wenn er auch verwoben ist mit dem allgemeinen Nahost-Konflikt und dem Kurdenproblem, so erscheint der Konflikt über die Kontrolle der Wasserressourcen im Jordanbecken nur lösbar im Kontext einer umfassenden Regelung zwischen Israel, seinen Nachbarn sowie der Palästinensischen Autonomiebehörde.

Im einzelnen geht es bei diesem Konflikt um die Verteilung knapper Wasserressourcen, die insgesamt nur etwa 50 % des Wasserbedarfs in der semi-ariden Region decken. Der Ressourcenkonflikt, d. h. die Frage einer gerechten Verteilung des Wassers des Jordans und seiner Quell- und Nebenflüsse sowie der Verfügung über verschiedene unterirdische Wasserspeicher, wird jedoch überlagert von einem politischen und einem Sicherheitskonflikt, bei denen es primär um die Verwirklichung des Selbstbestimmungsrechts der Palästinenser in einem eigenen Staat und um die Gewährleistung der politischen, ökonomischen und militärischen Sicherheit Israels geht.²³

²² Vgl. Durth, Grenzüberschreitende Umweltprobleme, S. 249f.

²³ Vgl. Peter Rogers and Peter Lydon (Hg.), Water in the Arab World. Perspectives and Prognoses. Cambridge, MA, 1994; ferner die bereits zitierte Studie von Libiszewski sowie Manuel Schiffler, Konflikte um Wasser – ein Fallstrick für den Friedensprozeß im Nahen Osten?, in: Aus Politik und Zeitgeschichte. Beilage zur Wochenzeitung Das Parlament, Heft B 11/95, 10. März 1995, S. 13-21; Peter H. Gleick, Water and Con-

Bis in die neunziger Jahre war der Konflikt im Jordanbecken gekennzeichnet durch ein einseitiges Vorgehen der verschiedenen Konfliktparteien. Mit einer Mischung von militärischen und diplomatischen Maßnahmen verhinderte Syrien 1961 eine Ableitung des oberen Jordanwassers und seine Nutzung zur Speisung des nationalen israelischen Wasserversorgungssystems („*National Water Carrier*“). In der Folge mußte Israel auf Druck der Truce Supervision Organisation (UNTSO) die Einleitungsquelle an das Nordwestufer des Tiberiasssees verlegen. Auf die Fertigstellung des israelischen Wasserversorgungssystems antwortete die Arabische Liga 1964 mit dem Plan, den Baniyas und den Hasbani, zwei Quellflüsse des Jordan, nach Norden umzuleiten – ein Projekt, das Israel militärisch zu vereiteln wußte. Währenddessen hatte Jordanien mit internationaler Finanzhilfe am östlichen Jordanofer einen Seitenkanal gebaut, den späteren King Abdullah-Kanal, der zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Anbauflächen im Nordwesten Jordaniens und zur Wasserversorgung von Amman dient. Zur Gewährleistung eines kontinuierlichen Zuflusses wurden am Yarmuk, dem wichtigsten Nebenfluß des Jordan, und an der Grenze zu Syrien zwei Staudämme vorgesehen, von denen einer bis 1967 fertiggestellt, im Sechstage-Krieg von den Israelis aber wieder zerstört wurde.

Der Sechstage-Krieg von 1967 veränderte das gesamte Wasserszenario in der Region: Israel kontrollierte nunmehr mit den besetzten Golanhöhen und der Sicherheitszone im Südlibanon die Quellflüsse des Jordan; außerdem war es zu einer großzügigen Nutzung des Yarmuk in der Lage. Mit der Besetzung der „Westbank“ kontrollierte Israel auch die größten unterirdischen Wasserspeicher der Region („*Mountain Aquifer*“).

Zuvor hatte Israel nur über diejenigen Wasserspeicher verfügen können, deren Fließrichtung nach Norden oder nach Westen verlief. Hinzu kam jetzt der in der Westbank gelegene östliche Abfluß, den bisher ausschließlich die Palästinenser genutzt hatten, deren Wasserrechte nunmehr drastisch beschnitten wurden. Darüber hinaus konnte Israel noch einen überbeanspruchten, küstennahen Wasserspeicher ausbeuten, der sich parallel zur Küste bis zum Gazastreifen erstreckt.

flict. Occasional Paper Series of the Project on Environmental Change and Acute Conflict, Nr. 1, September 1992, S. 3-27 (S. 17); Miriam R. Lowi, West Bank Water Resources and the Resolution of Conflict in the Middle East, ebenda, S. 29-60 (S. 34); Helena Lindblom, Water and the Arab-Israeli Conflict, in: Leif Ohlsson (Hg.), Hydro-politics. Conflicts over Water as a Development Constraint. London, 1995, S. 55-90; Beschoner, Water and Instability in the Middle East, S. 8-26; Amikam Nachmani, Water Jitters in the Middle East, in: Studies in Conflict & Terrorism, Bd. 20, Nr. 1 (Januar-März 1997), S. 67-93. Zur Entwicklung seit Beginn des Friedensprozesses vgl. Alwyn R. Rouyer, The Water Issue in the Palestinian-Israeli Peace Process, in: Survival, Bd. 39, Nr. 2 (Sommer 1997), S. 57-81.

Damit verfügt Israel über eine weitgehend gesicherte Wasserversorgung für den Bedarf seiner Bevölkerung (31 %), der Landwirtschaft (63 %) und Industrie (6 %). Der große Anteil der Landwirtschaft ergibt sich daraus, daß Israel bei der Ernährung seiner Bevölkerung autark sein will und landwirtschaftliche Überschüsse als Devisenbringer zum Kauf lebenswichtiger Rohstoffe betrachtet. Voraussetzung für die dazu erforderliche landwirtschaftliche Produktion ist jedoch die Bewässerung von etwa 50 % der Anbauflächen. Der durch das Ende der achtziger Jahre rapide Bevölkerungswachstum (als Folge der Einwanderung russischer Juden) erhöhte Bedarf an Wasser wird durch effizientere Technologien (Tropf- statt Flächenbewässerung), Umstellung bei den landwirtschaftlichen Produkten zugunsten weniger wasserabhängiger Kulturen und durch die Entsalzung von Brack- und Salzwasser weitgehend gedeckt.

1994 hat sich Israel zum ersten Mal vertraglich – im israelisch-jordanischen Friedensvertrag – zur Aufteilung grenzüberschreitender Wasserressourcen bereit erklärt. Darin wurde Jordanien das Recht auf die Nutzung des größten Teils des Wassers im Yarmuk – bis auf 45 Mill. m³/Jahr – und Israel das Recht auf den größten Teil des Jordanwassers – bis auf 40 Mill. m³/Jahr für Jordanien – zugesprochen. Zu diesem Zweck wollen beide Staaten am Yarmuk an der israelisch-jordanisch-syrischen Grenze ein gemeinsames Staudammprojekt in Angriff nehmen, gegen das jedoch Syrien Einwände erhebt. Außerdem wurde eine gemeinsame Wasserkommission eingerichtet.

In der Prinzipienerklärung von Oslo hatten sich die israelischen und palästinensischen Unterhändler in der Frage der Wasserressourcen auf die Festlegung allgemeiner Grundsätze beschränkt, konkrete Regelungen jedoch auf spätere Abmachungen vertagt. Insofern stellt das Interimsabkommen von 1996 („Taba-Abkommen“) einen politischen Durchbruch im Wasserkonflikt zwischen Israel und der Palästinensischen Autonomiebehörde dar. Israel erkannte darin das Recht der Palästinenser auf die Nutzung der unter ihrem Territorium befindlichen unterirdischen Wasserreservoir an. Ähnlich wie im Abkommen mit Jordanien wurde eine gemeinsame Wasserkommission eingerichtet, die weitreichende Rechte haben und das Bohren neuer Brunnen, den Bau von Abwassersystemen sowie die Erschließung zusätzlicher Wasserquellen überwachen soll. Außerdem gestand Israel den Palästinensern aus dem Eastern Mountain Aquifer in der Westbank insgesamt einen Anteil von 60 Mill. m³/Jahr zu und stellte ihnen zusätzliche Wasserlieferungen aus seinem nationalen Wassersystem, insbesondere in den Gazastreifen, in Aussicht.²⁴

²⁴ Vgl. Schiffler, Konflikte um Wasser, S. 15, und Rouyer, The Water Issue, S. 70-74. Außerdem finanziert Israel ein Pilotprojekt zur Wasserentsalzung im Gazastreifen.

Beide Vereinbarungen bilden einen wichtigen Fortschritt in der Wasserfrage vor allem insofern, als Israel erstmals die Notwendigkeit gemeinsamer Regelungen anerkannt hat. In der Sache hat es sich jedoch im wesentlichen darauf beschränkt, einen Wechsel auf die Zukunft auszustellen, d. h. es hat nur Zusagen über solche Wassermengen gemacht, die durch wassertechnische Maßnahmen, wie z. B. den Bau eines Staudammes am Yarmuk, und durch eine effizientere Wassernutzung zusätzlich gewonnen werden können. Über die gemeinsame Wasserkommission mit den Palästinensern ist es Israel darüber hinaus gelungen, weiterhin die Wassernutzung in der Westbank zu kontrollieren. Die Vereinbarungen werden es jedoch Israel und den palästinensischen Autonomiebehörden erleichtern, für ihre Wasserprojekte in Zukunft verstärkt Kredite und Hilfe internationaler Geldgeber zu erhalten. Vielleicht wird auf ihrer Grundlage eine gemeinsame Vertrauensbasis geschaffen, durch die später umfassendere politische Lösungen erleichtert werden könnten.

Keine Einigung gibt es bisher mit Syrien. Die Friedensgespräche zwischen diesen beiden Ländern sind vor allem deshalb nicht vorangekommen, weil Israel sich bisher geweigert hat, auf den größten Teil der Golanhöhen zu verzichten und die Kontrolle über die Quellflüsse des Jordans aufzugeben. Aus israelischer Sicht ist die Gewährleistung seiner Wasserversorgung integraler Bestandteil seines Sicherheitskonzeptes. Eine Lösung für dieses Problem dürfte sich erst dann finden lassen, wenn sich der Staat Israel in seinem nationalen Bestand nicht mehr gefährdet sieht und das Recht der Palästinenser anerkennt, in einem eigenen Staat zu leben. Notwendig ist daher ein integrales Friedenskonzept, das militärische Sicherheit mit Ressourcensicherheit verbindet.

Langfristig werden sich die Wasserprobleme der Region nur durch ein differenziertes internationales Wassermanagement lösen lassen, das eine faire Verteilung der knappen Ressource Wasser („*equitable distribution*“) mit einem Plan zur Schonung der natürlichen Wasservorkommen der Region („*sustainable development*“) verbindet, d. h. auf eine maximale Ausbeutung der Flüsse und der unterirdischen Reservoirs der Region verzichtet. Dazu empfiehlt sich ein Mix von technischen, administrativen und marktwirtschaftlichen Instrumenten, wie z. B. der Anbau von Produkten, die weniger Wasser benötigen, der Bau von Anlagen zur Abwasserreinigung und zur Wasserentsalzung, die Steuerung des Bevölkerungswachstums und die Regulierung des Wasserpreises sowie der Import von Süßwasser aus anderen Regionen (z. B. der Türkei). Dies setzt jedoch voraus, daß zuvor oder gleichzeitig die politischen Probleme geregelt werden.

c) andere Konfliktregionen

– Gangesbecken

Ein ähnliches, wenn auch derzeit weniger akutes Konfliktszenario gibt es auf dem indischen Subkontinent, auf dem die Frage der Verteilung und des Managements des Gangeswassers in einen Kontext von extremer Armut, ethnopolitischen Spaltungen und ökologischer Degradation eingebettet sowie eng mit den politischen Gegensätzen zwischen den Staaten des Subkontinents und den Hegemonialansprüchen Indiens verwoben ist.²⁵

– Nil und Mekong

Ein ganz anderes Problem behindert ein effektives Wassermanagement am Nil und am Mekong. In beiden Flußbecken kooperieren zwar einige der Unterlieger miteinander, ohne daß es ihnen jedoch bisher gelungen ist, die oder den Oberliegerstaat in eine Kooperation einzubeziehen. Während die Zusammenarbeit zwischen Ägypten und dem Sudan bis in die Zeit zurückreicht, als beide als Protektorate oder Kolonien zum Britischen Empire gehörten, ist es bisher nicht gelungen, Äthiopien in diese Zusammenarbeit wirksam zu integrieren. Die Gründe dafür sind in der Zugehörigkeit zu verschiedenen „Lagern“ im Ost-West-Konflikt ebenso wie in den innenpolitischen Problemen Äthiopiens zu sehen. Erst allmählich normalisiert sich das Verhältnis zwischen den Staaten der Region und läßt für die Zukunft verbesserte Kooperationsmöglichkeiten erwarten.²⁶

Im Mekongbecken haben politische Konflikte bisher eine engere Zusammenarbeit zwischen den Anliegerstaaten China, Myanmar (Burma), Laos, Kambodscha und Vietnam verhindert. Das Mekong-Komitee, dem die drei Untieranliegerstaaten angehören, hat sich in der Vergangenheit nahezu ausschließlich auf den Austausch von Informationen und auf die Ausarbeitung von langfristigen Entwicklungsplänen beschränkt. Eine Einbeziehung der Volksrepublik China ist ebenfalls bisher ge-

²⁵ Vgl. René Klaff, Der Induswasserkonflikt – Ansätze eine pragmatischen Wasserpolitik in der Konfliktregion Südasien, in: Barandat, Wasser – Konfrontation oder Kooperation, S. 234-262; Ashok Swain, Conflict over Water: The Ganges Water Dispute, in: Security Dialogue, Bd. 24 (1993), Nr. 4, S. 429-439; ders., Displacing the Conflict: Environmental Destruction in Bangladesh and Ethnic Conflict in India, in: Journal of Peace Research, Jg. 33, Nr. 2 (Mai 1996), S. 189-204; Elizabeth Corell and Ashok Swain, India: The Domestic and International Politics of Water Scarcity, in: Ohlsson, Hydropolitics., S. 123-148.

²⁶ Vgl. Manuel Schiffler, Konflikte um den Nil oder Konflikte am Nil?, in: Barandat, Wasser – Konfrontation oder Kooperation, S. 263-276; Jan Hultin, The Nile: Source of Life, Source of Conflict, in: Ohlsson, Hydropolitics, S. 29-54; Raj Krishna, The Legal Regime of the Nile River Basin, in: Joyce R. Starr und Daniel C. Stoll, The Politics of Scarcity. Water in the Middle East. Boulder, Co, 1988, S. 23-40.

scheitert. Diese beharrt auf der nationalen Souveränität über die Wasserressourcen auf ihrem Territorium und hat z. B. deshalb 1997 – ähnlich wie die Türkei – gegen die Annahme der Wasser-Konvention in den Vereinten Nationen gestimmt. Ohne die Mitwirkung Chinas ist jedoch eine umfassende Entwicklung des Mekongbeckens nicht möglich.²⁷

Einvernehmliche Regelungen werden naturgemäß dann erschwert, wenn ein Staat – unabhängig davon, ob es sich um einen Oberlauf- oder einen Unterlaufstaat handelt – in der Region dominiert und seine Interessen ohne Absprache mit anderen Staaten durchsetzen kann. Dieser wird nur dann an einer einvernehmlichen Lösung interessiert sein, wenn er andernfalls wichtige Ziele auf anderen Gebieten nicht erreichen kann oder wenn er ein besonderes Interesse an regionaler Stabilität hat, zu deren Voraussetzungen kooperative Regelungen in der Wasserfrage gehören. Im letzteren Fall – so z. B. die USA im Verhältnis zu Mexiko – kann er dann als „gutmütiger Hegemon“ („*benevolent hegemon*“) wirken.

3 Die Suche nach internationalen Regelungsansätzen

Meine Fragestellung lautete: Aus welchen Gründen und unter welchen Bedingungen kommt es zu internationalen Konflikten über die Nutzung von Wasser? Welches Verhältnis besteht zwischen Konflikten um Wasser und anderen Konflikten? Und schließlich: Welche Regelungsmechanismen und Lösungsansätze haben sich in der Vergangenheit bewährt, welche könnten sich in der Zukunft als erfolgversprechend erweisen?

Ursachen und Arten von Wasserkonflikten

Die Frage nach den Ursachen von Wasserkonflikten läßt sich dahingehend beantworten, daß es sich primär um Verteilungskonflikte um ein knappes Gut handelt, von dem die Anlieger einen ihren Bedürfnissen entsprechenden quantitativen und qualitativen Gebrauch machen wollen. Dies schließt die Forderung nach Reinhaltung und Bestandserhaltung der Frischwasserressourcen ebenso wie der im Süßwasser lebenden biologischen Ressourcen sowie der unterirdischen Wasserspeicher ein. Dabei stehen sich in der Regel die Interessen der durch die Geogra-

²⁷ Vgl. Joakim Öjendal, *Mainland Southeast Asia: Co-operation or Conflict over Water?*, in: Ohlsson, *Hydropolitics*, S. 149-177; Prachoom Chomchai, *Institutional Aspects of Developing and Managing Conflicts over the Use of an International River Basin: A Mekong Case-Study*, in: Werner Pfennig und Sarasin Viraphol (Hg.), *ASEAN – UN Cooperation in Preventive Diplomacy*. Bangkok, 1995, S. 218-247.

<i>Rang</i>	<i>Verteilungskonflikte</i>	<i>Verschmutzungskonflikte</i>
<i>primärer Konflikt</i>	Wasser ist die Ursache eines zwischenstaatlichen Konflikts.	Der Wasserkonflikt läßt sich von anderen Konflikten isolieren und läßt sich integrativ oder institutionell lösen.
<i>sekundärer Konflikt</i>	Dem Wasserkonflikt liegt ein anderer internationaler Konflikt zugrunde.	Mit dem Wasserkonflikt geht ein anderer ökologisch-ökonomischer oder gesellschaftlicher Konflikt einher.

Abb. 2
Arten von Wasserkonflikten

phie privilegierten Oberlauf- und der benachteiligten Unterlaufstaaten diametral gegenüber. Während die einen die nationale Verfügungsmacht über die auf ihrem Territorium vorkommenden Wasserressourcen beanspruchen, betrachten die anderen Wasser als ein öffentliches Gut, dessen Nutzung allen zusteht und dessen Verteilung einvernehmlich geregelt werden müsse.

Internationale Verteilungskonflikte können primärer ebenso wie sekundärer Art sein. Als ein primärer Wasserkonflikt mit militärischen Risiken, die nur durch die machtpolitische Dominanz der Türkei im Zaum gehalten werden, ist der Konflikt über das Euphratwasser anzusehen, der sich am Bau des GAP-Projektes in der Türkei entzündet hat. Beim Konflikt über die Nutzung des Nilwassers hat Ägypten seinerseits – hier jedoch der Unterliegerstaat – militärische Aktionen angedroht, sollten der Sudan oder Äthiopien Maßnahmen ergreifen, die zu einer Reduzierung des für Ägypten lebenswichtigen Nilwassers führen könnten. Eine Regelung des Konfliktes setzt voraus, daß eine gerechte Lösung für die Verteilung der umstrittenen Wasserressourcen gefunden wird, die keinen Anlieger über Gebühr benachteiligt.

Die Konflikte über die Nutzung des Jordanwassers und der unterirdischen Wasserspeicher in der Region sind jedoch als eher sekundär einzuschätzen, obwohl es sich ebenfalls um die gerechte Verteilung einer hier sogar besonders knappen Ressource handelt. Primär ist jedoch der Nahost-Konflikt, bei dem es im Kern um die Frage nach der Anerkennung der nationalen Existenz und militärischen Sicherheit Israels ebenso wie um die eines unabhängigen Palästinenserstaates geht sowie um die Gewährleistung der Sicherheit der Staaten der Region. Verschiedene kleinere Konflikte zwischen Israel und Syrien, insbesondere die Ableitung des oberen Jordan bzw. seiner Quellflüsse für die nationale Wasserver-

sorgung, haben wiederholt zu militärischen Aktionen zwischen beiden Ländern geführt und den Nährboden für den Sechstage-Krieg von 1967 bereitet. In diesem Krieg hat sich Israel nicht nur sichere Grenzen, sondern auch eine gesicherte Wasserversorgung erkämpft. Die Gewährleistung seiner Wasserversorgung, die nach Auffassung Israels die Kontrolle über den Südlibanon, die Golanhöhen und den Mountain Aquifer bedingt, ist daher eines der größten Hindernisse für die Umsetzung der Übereinkunft von Oslo ebenso wie für eine Friedensregelung mit Syrien.

Die Frage nach Regelungs- und Lösungsansätzen muß sich daher in erster Linie auf die dem Konflikt zugrundeliegenden Ursachen beziehen. Bei sekundären Konflikten ist daher darauf zu achten, daß für den Wasserkonflikt (Teil-)Lösungen gefunden werden, durch die eine Regelung des zugrundeliegenden primären Konflikts nicht erschwert, vielleicht sogar erleichtert wird. So könnte eine Zusammenarbeit zwischen Israelis und Palästinensern bei der Aufteilung und/oder der Erschließung neuer Wasserressourcen vertrauensbildend wirken und künftige Lösungen auf anderen Gebieten erleichtern.

Im Hinblick auf Umwelt- bzw. Verschmutzungskonflikte ist die Unterscheidung zwischen primären und sekundären Wasserkonflikten jedoch nicht ausreichend. Für ihre Lösbarkeit bietet sich eine weitere Differenzierung an. Die Empirie zeigt – z. B. im Fall des Rhein-Regimes oder der Regelung offener Wasserfragen zwischen den USA und Kanada –, daß eine Lösung dann eher möglich ist, wenn es sich bei den Konfliktpartnern um Staaten handelt, die stark miteinander vernetzt sind sowie über eine hohe institutionelle Problemlösungskapazität verfügen und außerdem wirtschaftlich in der Lage sind, durch Umweltauflagen erhöhte Wasserkosten zu tragen.²⁸ Demgegenüber wird die Lösung von Wasserproblemen – z. B. im Gangesbecken – außerordentlich erschwert, wenn es sich bei den beteiligten Staaten um Entwicklungs- oder Schwellenländer handelt, die entlang gesellschaftlicher, ethnischer und machtpolitischer Konfliktlinien angesiedelt sind und bei denen Wasserkonflikte mit der Degradation erneuerbarer Ressourcen (Wasser,

²⁸ Auf die Bedeutung der Vernetzung verweist insbesondere Durth, *Grenzüberschreitende Umweltprobleme und Integration*, S. 76ff.; ferner ders., *Zwischenstaatliche Kooperation bei grenzüberschreitenden Oberlauf-Unterlauf-Problemen und Regionale Integration*. Vortrag zum Themenbereich „Integration und Umwelt“, gehalten im Graduiertenkolleg „Integrationsforschung“. (Quelle: Sächsische Landesbibliothek). Die Verallgemeinerung dieser Aussage unter Ausblendung der anderen Bedingungsfaktoren erscheint der Verfasserin jedoch problematisch.

Land, Vegetation) einhergehen, die sich also gleichzeitig in sozioökologischen Krisenregionen befinden.²⁹

Während bei Konflikten zwischen entwickelten Industriestaaten eine Regelung mit einer Verdichtung und Institutionalisierung der Integration einhergehen wird, müssen im Fall von Entwicklungsgesellschaften – ähnlich wie bei den sekundären Ressourcenkonflikten – die angestrebten Lösungen die grundlegenden sozioökonomischen und ökologischen Probleme der beteiligten Länder mitbedenken bzw. vorrangig für diese Lösungen finden.

Elemente vertraglicher Regelungen

Da also jeweils der politische, ökonomische und soziale Kontext eines Wasserkonfliktes mitbedacht werden muß, kann es sich im folgenden nur um die Nennung von einigen Elementen handeln, die in eine Regelung von Wasserkonflikten einbezogen werden sollten:

- nachhaltiger Umgang mit den vorhandenen Ressourcen
 - gerechte Verteilung von Nutzen und Kosten
 - Gegenleistungen und Trade Offs
 - Verzicht auf Drohung oder Anwendung von Gewalt
 - Wirkung internationaler Interdependenz und Institutionen
 - positive internationale Rahmenbedingungen.
1. Dauerhafte Lösungen setzen in der Regel voraus, daß die gemeinsamen Wasserressourcen langfristig erhalten bleiben („*sustainable development*“) und der Umwelt kein nachhaltiger Schaden zugefügt wird.
 2. Wichtig ist ferner eine gerechte oder billige Verteilung von Nutzen und Kosten bzw. Schäden unter den Anliegerstaaten. Bei jedem Projekt oder Abkommen sollte darauf geachtet werden, daß kein Partner inakzeptable Schäden davonträgt, die nicht durch einen entsprechenden Nutzen aufgewogen werden. Wenn der Bau eines Kraftwerkes am Oberlauf eines Stromes oder seine industrielle Nutzung den Unterlieger beträchtlich belastet – z. B. Ungarn im Fall des Gabcikovo-Kraftwerkes oder Argentinien am Itaipu-Damm –, sollte dieser eine ausreichende Information und eine Berücksichtigung seiner berechtigten Interessen erwarten können.

²⁹ Für die Betonung der den meisten Wasserkrisen zugrundeliegenden Entwicklungskonflikte vgl. den vorzüglichen Abschlußbericht des Environment and Conflict Projektes ENCOP, s. Bächler u. a., *Kriegsursache Umweltzerstörung*, Bd. I, S. 292f.

3. Die Berücksichtigung der Interessen aller Beteiligten wird erleichtert durch die Möglichkeit von Gegenleistungen und Trade Offs. Im Konflikt über das Euphratwasser könnten Zusagen der Türkei über die Lieferung einer konstanten Wassermenge sowie über zusätzliche Stromlieferungen an die Deblockierung internationaler Kredite oder die Vereinbarung von langfristigen Lieferverträgen für landwirtschaftliche und industrielle Produkte geknüpft werden. Im Nahostkonflikt wäre das Äquivalent für die Aufgabe von Territorium die Gewährleistung einer gesicherten Wasserversorgung Israels.
4. Ein besonderes Problem stellen asymmetrische Machtverhältnisse und Nutzenerwartungen dar. Bisher haben die Türkei ebenso wie Ägypten ihre Auffassungen in den jeweiligen Wasserkonflikten unabhängig von ihrer Lage am Ober- bzw. Unterlauf durch die Androhung militärischer Gewalt durchgesetzt. Dauerhafte Regelungen sind jedoch nur dann möglich, wenn alle Beteiligten auf die Anwendung oder Androhung von Gewalt verzichten.
5. Die Regelungsfähigkeit eines Konfliktes hängt auch von der Vernetzung der beteiligten Staaten, z. B. in gemeinsamen Institutionen, die den Informationsaustausch und damit die Erwartungssicherheit erhöhen, sowie ihrer Kooperationsfähigkeit ab. Ein Vergleich der Chancen für eine Regelung der europäischen Wasserkonflikte im Vergleich zu denjenigen in Asien und Afrika verweist auf die enorme Bedeutung internationaler Vernetzung und Kooperation. Auch wenn in den meisten außereuropäischen Regionen die Voraussetzungen für eine enge wirtschaftliche und politische Integration nicht in gleicher Weise wie in Europa gegeben sind, könnte auch in diesen Ländern über eine begrenzte und punktuelle Zusammenarbeit Kooperation erprobt und allmählich eine gemeinsame Vertrauensbasis geschaffen werden. Ein Beispiel dafür ist die Kooperation zwischen Israel und Jordanien in den achtziger Jahren bei der Verteilung des Yarmukwassers, durch welche weiterreichende Wasserregelungen im israelisch-jordanischen Friedensvertrag erleichtert wurden.
6. In den meisten bisherigen Analysen über Wasserkonflikte wird ein wichtiger Faktor vernachlässigt: die internationalen Rahmenbedingungen. Viele Konflikte – die Beispiele reichen von der Elbe bis zum Nil und zum Mekong – erwiesen sich in der Vergangenheit deshalb als lösungsresistent, weil die Anliegerstaaten unterschiedlichen Blöcken angehörten. Nach dem Ende des Ost-West-Konfliktes beeinflusst häufig die Dominanz von konkurrierenden Regionalmächten den Ausgang eines Konfliktes. Andererseits können auch internationale Organisationen, wie die UN und ihre Sonderorganisationen, vor allem aber Weltbank und Entwicklungsfond über die Gewährung oder Versagung von internationalen Krediten regulierend auf den Austrag von Konflikten einwirken. Gelegentlich üben auch die Staatengemeinschaft oder ein regionaler „benevolent hegemon“ auf die Konfliktparteien oder einen Konfliktpartner politischen Druck aus.

Mögliche Lösungsmethoden

Bei den Regelungsmöglichkeiten kann zwischen verschiedenen Vorgehensweisen unterschieden werden:³⁰

- Einzelfallregelungen
- umfassende oder Paketlösungen
- Errichtung regionaler Regime und Institutionen/Organisationen
- Entwicklung eines internationalen Wasserrechts.

1. Einzelfallregelungen

Bei Einzelfallregelungen suchen die Konfliktparteien einen begrenzten Ausgleich, z. B. durch Gegenleistungen, finanzielle Entschädigungen oder Zusagen anderer Art, zu erreichen. Der Umfang dieser Leistungen und die Verteilung von Nutzen und Kosten wird sehr davon abhängen, wie groß die Interessendifferenzen und wie kooperativ oder konfrontativ die Machtasymmetrien zwischen den beteiligten Staaten ausgeprägt sind. Nur in den wenigsten Fällen dürfte die Aufteilung des vorhandenen Wassers zwischen zwei Staaten, wie sie von Indien und Pakistan im Hinblick auf das Induswasser vorgenommen wurde, allein eine befriedigende Lösung sein. Ein Blick auf die verschiedenen Wasserkonflikte zeigt vielmehr, daß allgemeine (militärische und ökonomische) Machtpotentiale von größerer Bedeutung sind als die asymmetrische Verfügung über einen Strom als Oberlauf- bzw. Unterlaufstaat.

2. Umfassende oder Paketlösungen

In diesem Fall ist die Lösung eines Wasserkonflikts im Rahmen einer größeren politischen Regelung zu sehen, z. B. als Teil eines Friedensvertrages (Beispiel israelisch-jordanischer Friedensvertrag). Eine andere Form umfassender Lösungen bezieht sich zwar auf einen Einzelfall, die Regelung erfolgt aber über eine multilaterale Vereinbarung (Beispiel Aktionsprogramm „Rhein 2000“). Andere Formen von Junktimestrategien werden im UNDP praktiziert (z. B. in Südostasien), indem die Gewährung von Entwicklungshilfe an von den Anliegern gemeinsam getragene Wassernutzungen gebunden wird.

³⁰ Die Theorie der Internationalen Beziehungen bietet dabei ein Raster, in dem Lösungsansätze diskutiert werden können. Für Einzelfalllösungen gibt der Realismus, für umfassende oder Paketlösungen die Linkagestrategie, für die Errichtung internationaler Regime und Institutionen die neoliberale Regime- und Institutionenanalyse und schließlich für die Entwicklung eines globalen Wasserrechts das Völkerrecht brauchbare analytische Folien ab. Eine etwas andere Systematik benutzt Thomas Bernauer, *Managing International Rivers*, in: Oran R. Young (Hg.), *Global Governance: International Institutions for the 21st Century*. Cambridge, MA., 1997, i. E. (Mskr.).

3. Errichtung regionaler Regime und Institutionen/Organisationen

Von einem Regime wird man dann sprechen, wenn die beteiligten Staaten eine Reihe von expliziten oder gewohnheitsmäßigen Regeln für die Reduzierung der bei einer Fortdauer des Konflikts entstehenden Kosten entwickeln und diese über einen längeren Zeitraum beachten. Diese Verhaltensregeln können, aber müssen nicht, in einem multilateralen Vertrag oder in einer Konvention niedergelegt sein. Als Beispiel wäre die 1992 von der ECE – der europäischen Regionalorganisation der UN – verabschiedete Konvention zum Schutz und zur Nutzung grenzüberschreitender Wasserstraßen und internationaler Seen (die sogen. „Helsinki Rules“) zu nennen.³¹ Etablieren sich zusätzlich von den Teilnehmern praktizierte detaillierte Verfahrensregeln, sprechen wir von einer gemeinsamen Institution. Zu den ältesten Institutionen gehören die Rhein- und die Donauschiffahrts-Kommissionen; ein weiteres Beispiel ist die noch von der britischen Kolonialmacht errichtete Nil-Kommission.

Einen Sonderfall bilden diejenigen Konflikte, an denen primär Staaten beteiligt sind, die einer gemeinsamen Organisation, wie z. B. der EU oder der ASEAN, angehören. In Europa hat der Prozeß der europäischen Integration zu einem hohen Grad an gemeinsamer Verflechtung unter den Mitgliedstaaten und zur Entwicklung gemeinsamer Werthaltungen geführt, durch die eine einvernehmliche Konfliktregelung erleichtert wird. Das erstaunliche Ergebnis unserer Untersuchungen ist jedoch, daß die Regelungskompetenz der EU bei der Reinhaltung des Rheins sehr begrenzt war, da die europäischen Standards für die Wasserreinhaltung bislang zu niedrig sind. Auch die ASEAN konnte eine multilaterale Kooperation am Mekong bisher nur wenig fördern, da zunächst die politischen Konflikte zwischen den Anrainern einer Regelung bedurften und z. B. China kein Mitglied ist.

4. Die Entwicklung eines internationalen Wasserrechts

Kernelement der im Frühjahr 1997 von der UN-Vollversammlung verabschiedeten Konvention für die nicht der Schifffahrt dienende Nutzung von internationalen Strömen³² ist der Grundsatz, daß ein Anliegerstaat einen internationalen Strom („*international watercourse*“) in einer billigen und vernünftigen Art und Weise („*equitable and reasonable manner*“) zu dem Zweck nutzen sollte, einen optimalen und substanzerhaltenden Nutzen („*optimal and sustainable utiliza-*

³¹ Vgl. Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes („Helsinki Convention“), E-ECE/1267, March 17, 1992.

³² Vgl. United Nations Convention on the Law of the Non-Navigational Uses of International Watercourses. Doc. A/51/869, April 11, 1997. Zum Entstehungsprozeß vgl. Jörg Barandat, Dokumentation zur Entwicklung eines internationalen Wasserrechts, in: ders., Wasser – Konfrontation oder Kooperation, S. 413-431.

tion“) zu erreichen. Er ist jedoch verpflichtet, alle erforderlichen Maßnahmen zu ergreifen, damit durch diese Nutzung kein anderer Anliegerstaat einen beträchtlichen Schaden („*significant harm*“) erleidet. Dieser hat jedoch Nachteile durch eine bestimmungsgemäße Nutzung durch die anderen Anliegerstaaten hinzunehmen, falls sie nicht „beträchtlich“ sind. Um dies zu vermeiden, werden die Anliegerstaaten zur gegenseitigen Information und Zusammenarbeit aufgefordert.³³

Im Unterschied zu dem 1982 von der 3. Seerechtskonferenz (UNCLOS III) verabschiedeten Seerechtsübereinkommen enthält die Wasserkonvention keine supranationalen Elemente, geschweige denn Sanktionsmöglichkeiten. Inhaltlich geht sie nicht wesentlich über die Kodifizierung des Völkergewohnheitsrechtes hinaus. Außerdem bietet die Konvention einen breiten Auslegungsspielraum, der in Zukunft zu unterschiedlichen Interpretationen Anlaß geben dürfte. Bisher gibt es in der Staatengemeinschaft jedenfalls keinen Konsens in der Frage, wie weit die nationale Verfügungsmacht eines Staates über die von seinem Territorium aus zugänglichen Wasserressourcen reicht bzw. wann und unter welchen Bedingungen er die Rechte und Interessen der anderen Anrainerstaaten berücksichtigen muß.

4 Fazit

Die Auflage der UN-Konvention zur Nutzung internationaler Gewässer sollte nicht zu hoch bewertet werden. Zum einen ist nicht sicher, ob auch diejenigen Staaten der Konvention beitreten werden, die Konfliktparteien in internationalen Wasserkonflikten sind (z. B. China und die Türkei). Zum anderen ist in der Wasserkonvention durch ihre Ambivalenz bereits der Keim für neue Konflikte angelegt. Die Erfahrung zeigt, daß vor allem durch zwei Typen von Vereinbarungen Wasserkonflikte dauerhaft gelöst werden konnten: erstens durch umfassende Verträge, in denen die Interessen aller Beteiligten sorgfältig austariert und Kosten ebenso wie Lasten fair verteilt wurden, und zweitens durch sachbezogene Regime und Institutionen, die auf dem Interesse aller Beteiligten an einer Kooperation beruhen und deren Nutzen stets die Kosten der durch Beachtung ihrer Regeln bedingten Einschränkungen ihres Handlungsspielraums aufwiegt. Stärker noch als in multifunktionalen Institutionen bildeten sich in gemeinsamen Wasserregimen und Insti-

³³ Vgl. Heintze, Wasser und Völkerrecht, S. 288-294 (S. 290); Zum Entstehungsprozeß vgl. ferner Jörg Barandat, Dokumentation zur Entwicklung eines internationalen Wasserrechts, in: ders., Wasser – Konfrontation oder Kooperation, S. 413-431; E. J. Manner und Veli-Marti Metsälampi (Hg.), The Work of the International Law Association on the Law of International Water Resources. Helsinki 1988.

tutionen auf die Grundlage gegenseitiger Information und Berechenbarkeit gegründete Verhaltensweisen heraus, die eine kooperative Regelung auch von neuen Wasserproblemen erlauben.³⁴

Für die Zukunft ist von einer zunehmenden Verknappung der auf der Erde nutzbaren Wasserressourcen als Folge von wirtschaftlicher Entwicklung, Bevölkerungswachstum und Anhebung des Lebensstandards auszugehen. Eine verstärkte Forschung über die Ursachen von Wasserkonflikten, ihre Austragungsmodi und die Möglichkeit von einvernehmlichen Regelungen ist daher ein besonderes Desiderat angesichts der Wahrscheinlichkeit, daß in Zukunft internationale Wasserkrisen sowohl quantitativ zunehmen als auch konflikthafte Formen annehmen dürften.

³⁴ Hierdurch werden Forschungsergebnisse bestätigt, die im Hinblick auf eine institutionelle Kooperation in Sicherheitsfragen gewonnen wurden, vgl. Helga Haftendorn und Otto Keck (Hg.), *Kooperation jenseits von Hegemonie und Bedrohung. Sicherheitsinstitutionen in den internationalen Beziehungen*. Baden-Baden: Nomos, 1997.

**Wissenschaftliche Vorträge
in den Klassen**

Wolfgang Beitz

Konstruktionswissenschaft/Konstruktionstechnik

(Vortrag in der Sitzung der Technikwissenschaftlichen Klasse am 26. März 1997)

Einleitung

Die Entwicklung und Konstruktion nehmen in der Prozeßkette der Produktentstehung technischer Produkte eine herausragende Rolle ein, werden doch bei ihr die wesentlichen Produkteigenschaften (Produktqualität) und auch die Herstellungs- und Gebrauchskosten entscheidend festgelegt. In zunehmendem Maße müssen auch Anforderungen hinsichtlich Ressourcenschonung, Recyclingfähigkeit und Umweltschutz erfüllt werden. Diesem komplexen Anforderungsspektrum steht gegenüber, daß der Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß noch stärkere Anteile intuitiv betonter Tätigkeiten und Erfahrungswissen enthält, die nur begrenzt der elektronischen Datenverarbeitung übertragen werden können. Hinzu kommt, daß Entwicklungsprozesse zunehmend global, d. h. auf mehrere Standorte verteilt, abgewickelt werden, was eine methodisch-systematische Vorgehensweise erfordert.

1 Begriffsdefinitionen

Organisatorisch ist das Konstruieren (synonym: Entwickeln) ein wesentlicher und früher Bestandteil der Produktentstehung und des Produktlebenslaufs (Abb. 1). *Arbeitspsychologisch* ist das Konstruieren eine schöpferisch-geistige (kreative) Tätigkeit, die ihre Basis in den natur- und ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen, im Technologiewissen, in der Kunst und Formgestaltung, in der Wirtschaftswissenschaft, Psychologie und Soziologie sowie im Spezial- und Erfahrungswissen des jeweils zu bearbeitenden Fachgebiets hat (Abb. 2). *Methodisch* ist das Konstruieren ein Optimierungsprozeß, für ein gegebenes Spektrum von Anforderungen (Aufgabenstellung, Problemstruktur) eine Lösung bzw. ein Produkt zu finden. Bedingt durch die Vielfalt unterschiedlicher Anforderungen und Randbedingungen

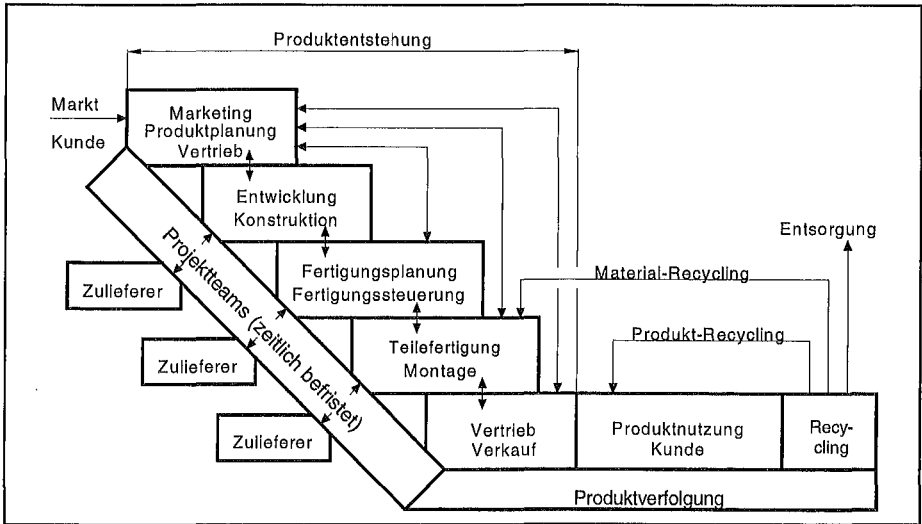


Abb. 1
 Produktentstehungsprozeß mit Simultaneous Engineering [3]



Abb. 2
 Wissensbereiche für das Entwickeln und Konstruieren
 Technischer Produkte und Prozesse

für stofflich und informationstechnische Produkte ist das Konstruieren eine vielschichtige Tätigkeit mit unterschiedlichen Schwerpunkten.

Die *Konstruktionswissenschaft* (Design Science) strebt an, mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden den Aufbau technischer Systeme und deren Beziehungen zu ihrem Umfeld so zu analysieren, daß aus den erkannten Zusammenhängen und Systemkomponenten Regeln zur Entwicklung neuer Systeme abgeleitet werden können. Man unterscheidet zwischen der *Theorie technischer Systeme* (Produkte und Prozesse) und der *Theorie der Konstruktionsprozesse* (Konstruktionstheorie) [1, 2].

Unter *Konstruktionstechnik/Konstruktionsmethodik* (Engineering Design Methodology) versteht man dagegen konkrete Handlungsanweisungen, die sich aus den Erkenntnissen der Konstruktionswissenschaft, aber auch aus Erfahrungen in unterschiedlichen Anwendungsfeldern ergeben haben [3]. Die Konstruktionsmethodik möchte das Entwickeln und Konstruieren branchenübergreifend unterstützen. Sie ist damit eine *Problemlösemethodik*, die in ihrer allgemeineren Form auch die Lösung nichttechnischer Probleme unterstützen kann.

2 Historischer Rückblick

Den Ursprung methodischen Konstruierens zu bestimmen, fällt schwer. War es Leonardo da Vinci (1452–1519), der ja bereits Lösungsmöglichkeiten systematisch nach erkennbaren Merkmalen und Gesichtspunkten variiert hat [4]? Im vorindustriellen Zeitalter war Konstruieren mit technischen Kunstwerken und dem Handwerk eng verknüpft.

Startet man bei Redtenbacher mit seinen „Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbaus“ [5], so ist die Reihe der Konstruktionsmethodiker groß (Abb. 3). Zwischen dem Handbuch „Der Konstrukteur“ von Reuleaux [6] und der „Konstruktionslehre“ von Pahl/Beitz [3] liegen 100 Jahre Konstruktionsforschung und -lehre.

3 Heutige Methoden

Definiert man das Konstruieren als *Problemlösen*, so führen die dazu erforderlichen Fähigkeiten und Kenntnisse zu den Feldern der Konstruktionsforschung.

Faktenwissen

Branchenübergreifendes Faktenwissen betrifft vor allem die ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen, insbesondere die Maschinenelemente (mechanische und elektronische Konstruktionskomponenten), die Werkstoffe sowie die Prinzipien der Mechanik [7]. Innovationsfaktoren und damit auch Forschungsgegenstände sind heute die Ent-

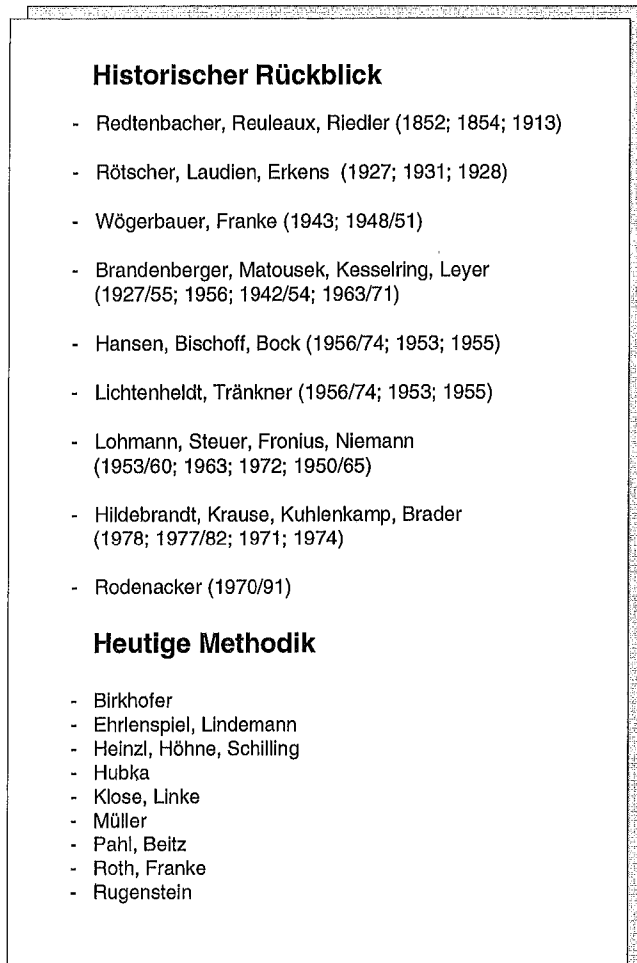


Abb. 3

Stationen zur Konstruktionsmethodik

(deutschsprachige Auswahl, Jahreszahlen sind Erscheinungsdaten bekannter Werke)

wicklung neuer Werkstoffe, mechatronische Lösungen, verbesserte Auslegungs- und Optimierungsverfahren, Baureihen- und Baukastenstrukturen sowie die Komponentenstandardisierung. Forschungs- und Entwicklungsziele sind die Steigerung der Tragfähigkeit, der Dauerfestigkeit und der Lebensdauer, die Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeiten und die Verbesserung der Funktionseigenschaften sowie Qualitäts- und Kostenverbesserungen.

Allgemeine Hilfsmittel

- Literatur, Kataloge, Datenbanken, Patente
- Analyse der Natur
- Analyse bekannter Lösungen
- Experimente an Modellen und Baumustern
- Heuristische Operationen:
Abstrahieren, Verallgemeinern, Analysieren,
Definieren, Zergliedern, Ordnen, Kombinieren,
Schematisieren, Konkretisieren, Detaillieren,
Iterieren, Darstellen,.....
Bewerten, Auswählen, Vergleichen

Intuitiv betonte Methoden

- Brainstorming
- Synektik
- Galeriemethode
- Delphi - Methode
- Design - Methoden

Diskursiv betonte Methoden

- Systematische Problemstrukturierung
- Systematische Variation von
Lösungsmerkmalen
- Systematische Lösungskombination
- Mathematisch - numerische Methoden
- Szenario - Analyse / Prognostik

Baustrukturen, Bauweisen

- Baureihenprinzip
- Baukastenprinzip
- Differentialbauweise
- Integralbauweise
- Verbundbauweise

Auswahl- und Bewertungsmethoden

- VDI - Richtlinie 2225
- Nutzwertanalyse
- Auswahllisten
- Wertanalyse

Methoden zur Qualitätssicherung

- Fehlerbaumanalyse
- Fehler- Möglichkeits- und
Einflußanalyse (FMEA)
- Risikogerechte Gestaltung
- Quality Function Deployment (QFD)
- House of Quality Management (HoQ)
- Total Quality Management (TQM)

Methoden zur Kostenerkennung

- Materialkosten
- Relativkosten
- Regressionsanalysen
- Ähnlichkeitsbeziehungen
- Kostenstrukturen
- Wertanalyse

Abb. 4

Allgemeine Lösungsmethoden [3]

Abb. 6

Integrierte Konstruktionsmethoden [3]

Grundregeln zur Gestaltung

- Eindeutig
- Einfach
- Sicher

Gestaltungsprinzipien

- Prinzipien der Kraftleitung
- Gleiche Gestaltfestigkeit
- Kurze Kraftleitung
- Ausgenutzte Verformung
- Abgestimmte Verformung
- Kraftausgleich
- Prinzip der Aufgabenteilung
(Funktionstrennung, Differential-
bauweise, Verbundbauweise)
- Prinzip der Funktionsintegration
(Integralbauweise)
- Prinzip der Selbsthilfe
- Prinzip der Stabilität und Bistabilität
- Prinzip der fehlerarmen Gestaltung

**Gestaltungsrichtlinien hinsichtlich
Beanspruchung**

- Festigkeitsgerecht
- Formänderungsgerecht
- Ausdehnungsgerecht
- Stabilitätsgerecht
- Kriech- und relaxationsgerecht
- Korrosionsgerecht
- Verschleißgerecht

**Gestaltungsrichtlinien hinsichtlich
Fertigung und Gebrauch**

- Fertigungsgerecht
- Montagegerecht
- Prüfgerecht
- Transportgerecht
- Ergonomiegerecht
- Formgebungsgerecht (Industrie Design)
- Gebrauchsgerecht
- Instandhaltungsgerecht
- Recyclinggerecht

Abb. 5

Entwurfsmethoden [3]

Methodenwissen

Die Konstruktionsforschung hat in den letzten 30 Jahren eine Vielfalt von Lösungs- und Entwurfsmethoden entwickelt, die allgemeiner einsetzbar sind und die die speziellen Methoden der Mechanik, Thermodynamik und Werkstofftechnik sowie auch produktspezifische Methoden ergänzen (Abb. 4 bis 6) [3, 7].

Darüber hinaus wurden Ablaufpläne für den Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß entwickelt, die die erforderlichen Phasen und Arbeitsschritte nach grundlegenden technischen und logischen Zusammenhängen (vom Abstrakten zum Konkreten) verknüpfen [3, 8]. Diese Ablaufpläne sind auch Grundlage für rechnerintegrierte Entwicklungs- und Konstruktionsleitsysteme, u. a. mit neuen Ablaufstrukturen wie Simultaneous Engineering (Abb. 1) und Projektorganisation [3, 9]. Ein weiteres Forschungsfeld ist die ganzheitliche Berücksichtigung und Bewertung unterschiedlicher Anforderungsbereiche bei der Lösungsauswahl sowie eine stärkere Kundenintegration in die Produktplanung und -entwicklung (Abb. 7).

Denkpsychologische Erkenntnisse

Da der Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß vor allem ein schöpferisch-geistiger Prozeß des Menschen ist, lag es nahe, die sich bei diesem abspielenden Zusammenhänge durch Psychologieforschung untersuchen zu lassen. Weitere Gründe für diese denkpsychologische Forschung waren die nur zögerliche Akzeptanz der

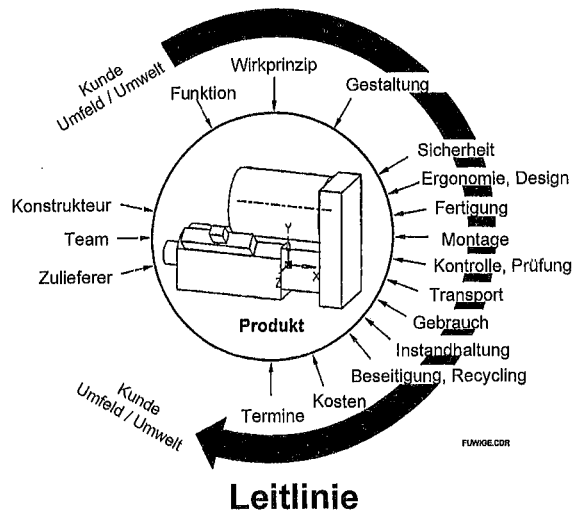


Abb. 7

Einflußgrößen und Bedingungen beim Entwickeln und Konstruieren [3]

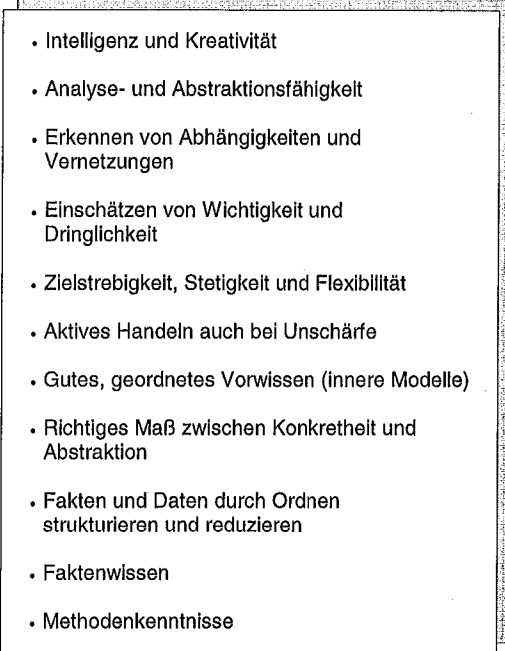
- 
- Intelligenz und Kreativität
 - Analyse- und Abstraktionsfähigkeit
 - Erkennen von Abhängigkeiten und Vernetzungen
 - Einschätzen von Wichtigkeit und Dringlichkeit
 - Zielstrebigkeit, Stetigkeit und Flexibilität
 - Aktives Handeln auch bei Unschärfe
 - Gutes, geordnetes Vorwissen (innere Modelle)
 - Richtiges Maß zwischen Konkretheit und Abstraktion
 - Fakten und Daten durch Ordnen strukturieren und reduzieren
 - Faktenwissen
 - Methodenkenntnisse

Abb. 8

Kennzeichen guter Problemlöser [3, 9, 12 bis 15]

Konstruktionsmethodik in der Industriepraxis und die zunehmende Integration der elektronischen Datenverarbeitung. Insbesondere für letztere ist es notwendig, die Rolle und die Fähigkeiten des Menschen für diesen Prozeß zu analysieren [10, 11]. Ein interessantes Ergebnis ist in Abb. 8 zusammengestellt: Was macht gute Problemlöser aus [12 bis 15]?

4 Eigener Beitrag zur Konstruktionsforschung

Die eigene Forschung hat seit der Berufung 1968 zunächst die Themen des Vorgängers – Verbindungstechnik und Kunststoff-Zahnräder – fortgesetzt und ausgebaut. Neben den vielseitig eingesetzten Schrauben- und Welle-Nabe-Verbindungen wurde dabei die gesamte Verbindungsvielfalt aufgegriffen, insbesondere schnell lösbare Verbindungen, die auch Gegenstand des Teilprojekts „Auswahl, Gestaltung und Anordnung von Verbindungen“ des Sonderforschungsbereichs 281 „Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Mate-

rialkreisläufen“ sind [16]. Seit 1968 wurden in diesem Forschungsfeld 26 Dissertationen erarbeitet.

Die Erforschung des Tragverhaltens, der Lebensdauer und der Verlustleistungen von Kunststoffzahnradern mit dem Ziel, diese mit ihren günstigen Geräuscheigenschaften und ihrer Trockenlauffähigkeit auch für Leistungsgetriebe einsetzen zu können, ist ein weiterer Schwerpunkt der eigenen Forschung (seit 1968 5 Dissertationen).

Einen wichtigen Forschungsschwerpunkt betrifft die Entwicklung von generellen und speziellen Gestaltungsmethoden [3]. Im Vordergrund stehen dabei Regeln zur recycling- und demontagegünstigen Produktgestaltung, die auch zur VDI-Richtlinie 2243 [17] führten. Diese Arbeiten werden zur Zeit im Teilprojekt „Gestaltungsregeln für Baustruktur, Füge­teile und Demontagehilfen“ des SFB 281 [16] intensiv fortgesetzt. Auf diesem Gebiet wurden bereits 5 Dissertationen durchgeführt.

Im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojekts, gemeinsam mit Arbeitswissenschaftlern und Psychologen, stand die Frage nach der „Wirksamkeit und Erlernbarkeit der Konstruktionsmethodik“ im Mittelpunkt der Betrachtung [18, 19]. In diesem Zusammenhang wurde auch die Beanspruchung während des Konstruierens untersucht und daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet [20].

Schließlich werden seit langem die Möglichkeiten der Rechnerunterstützung für den Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß untersucht. Schwerpunkte sind hierbei die Entwicklung von Berechnungsprogrammen, deren unmittelbare Kopplung mit Gestaltungsprogrammen (Geometriemodellierern), die Entwicklung von wissensbasierten Systemen für Gestaltungsaufgaben sowie der Aufbau rechnerintegrierter Entwicklungsleitsysteme. In diesem Forschungsbereich wurden seit 1968 24 Dissertationen abgeschlossen.

5 Internationale Situation

Konstruktionswissenschaft und Konstruktionstechnik werden in einem internationalen Vergleich vor allem bei den alle zwei Jahre stattfindenden ICED-Konferenzen behandelt [21]. Dabei konnte die deutsche Konstruktionsforschung ein hohes Niveau und eine große Breite nachweisen. Vor allem zeichnet die deutsche Forschung gegenüber Japan und den USA eine höhere Anwendungsnähe aus, was dazu geführt hat, daß auch die deutsche Ausbildung für Produktentwickler und Konstrukteure in besonderem Maße anerkannt ist. Trotzdem gibt es bei dieser auch Verbesserungsnotwendigkeiten, die aber in erster Linie im nichttechnischen Bereich liegen [22].

6 Ausblick

Zur Stärkung des Industriestandorts Deutschland ist die Erforschung und Anwendung einer rechnerintegrierten Produktentwicklungs- bzw. Konstruktionsmethodik zur Schaffung von weltmarktführenden Produktinnovationen mit hoher Qualität und in kurzen Entwicklungszeiten von großer Bedeutung [23, 24]. Hierzu wurde eine Initiative „Berliner Kreis – Wissenschaftliches Forum für Produktentwicklung e.V.“ gegründet, die maßgeblich die Forschungsschwerpunkte definieren und koordinieren und auch neue Förderprogramme vorschlagen will (Vorsitzender: W. Beitz). Das Fachgebiet Konstruktionstechnik ist heute durch die Erkenntnisse der Informations- und Kommunikationstechnik, der Arbeitswissenschaft und der Denk-, Arbeits- und Organisationspsychologie mit entsprechender Interdisziplinarität wissenschaftlich anspruchsvoll und für die industrielle Anwendung von höchster Bedeutung. Es ist deshalb eine Herausforderung, auf diesem Gebiet zu lehren und zu forschen.

Literatur

- [1] Beitz, W.: Design Science – The Need for a Scientific Basis for Engineering Design Methodology. *Journal of Engineering Design* 5 (1994), Nr. 2, 129-133.
- [2] Hubka, V., Eder, W. E.: *Theory of Technical Systems – A Total Concept Theory for Engineering Design*. Berlin: Springer 1988 (deutsche Ausgabe 1992).
- [3] Pahl, G., Beitz, W.: *Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung*. Berlin: Springer 1977 (1. Aufl.), 1997 (4. Aufl.). Ausgaben in Englisch (2. Aufl.), Ungarisch, Polnisch, Finnisch, Japanisch, Koreanisch, Chinesisch.
- [4] Reti, L.: *Leonardo – Künstler, Forscher, Magier*. Frankfurt: Fischer 1974.
- [5] Redtenbacher, F.: *Prinzipien der Mechanik und des Maschinenbaus*. Mannheim: Bassermann 1852.
- [6] Reuleaux, F.: *Der Konstrukteur – Ein Handbuch zum Gebrauch beim Maschinen-Entwerfen*. Braunschweig: F. Vieweg u. Sohn 1882 (4. Aufl.).
- [7] Dubbel, H.: *Taschenbuch für den Maschinenbau* (Hg. W. Beitz, K.-H. Grote), 19. Aufl. Berlin: Springer 1997.
- [8] VDI-Richtlinie 2221 (Obmann: W. Beitz): *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Düsseldorf: VDI-EKV 1993.
- [9] Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung*. München: Hanser 1995.
- [10] Pahl, G. (Hg.): *Psychologische und pädagogische Fragen beim methodischen Konstruieren*. Ladenburger Diskurs. Köln: Verlag TÜV Rheinland 1994.
- [11] Mackensen, R. (Hg.): *Konstruktionshandeln – Nicht-technische Determinanten des Konstruierens bei zunehmendem CAD-Einsatz*. München: Hanser 1997.
- [12] Dörner, D.: *Gruppenverhalten im Konstruktionsprozeß*. VDI-Berichte 1120, Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.

- [13] Dylla, N.: Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren. München: Hanser, Dissertationsreihe 1991.
- [14] Fricke, G.: Konstruieren als flexibler Problemlöseprozeß – Empirische Untersuchung über erfolgreiche Strategien und methodische Vorgehensweisen. Fortschrittsberichte VDI-Reihe 1, Nr. 227, Diss. Darmstadt 1993.
- [15] Frankenberger, E.: Arbeitsteilige Produktentwicklung – Empirische Untersuchung und Empfehlungen zur Gruppenarbeit in der Konstruktion. Diss. TH Darmstadt 1997.
- [16] SFB 281 (gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft): Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen. TU Berlin: Arbeits- und Ergebnisbericht 1995–97, Finanzierungsantrag 1998–2000.
- [17] VDI-Richtlinie 2243 (Obmann: W. Beitz): Konstruieren recyclinggerechter Produkte – Grundlagen und Gestaltungsregeln. Düsseldorf: VDI-EKV 1993.
- [18] Rückert, C.; Gaedeke, O.; Schroda, F.: Konstruktionsarbeit studentischer Übungsgruppen – Empfehlungen für die konstruktionsmethodische Ausbildung an Technischen Universitäten. Schriftenreihe Konstruktionstechnik (Hg. W. Beitz), H. 40, TU Berlin 1997.
- [19] Rückert, C.: Untersuchungen zur Konstruktionsmethodik – Ausbildung und Anwendung. Schriftenreihe Konstruktionstechnik (Hg. W. Beitz), Fortschrittsberichte VDI, Reihe 1, Nr. 293, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997 (Diss.).
- [20] Langner, Th.: Analyse der Einflußfaktoren beim rechnerunterstützten Konstruieren. Schriftenreihe Konstruktionstechnik (Hg. W. Beitz), H. 20, TU Berlin 1991 (Diss.).
- [21] Proceedings of ICED (International Conference on Engineering Design) 1981–1997 (ed. by V. Hubka and others), Schriftenreihe WDK 7, 10, 12, 13, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 24. Zürich: HEURISTA 1981–1997.
- [22] Beitz, W., Helbig, D.: Neue Wege zur Produktentwicklung – Berufsfähigkeit und Weiterbildung. Schriftenreihe Konstruktionstechnik (Hg. W. Beitz) H. 37, TU Berlin 1997.
- [23] Berliner Kreis: Neue Wege zur Produktentwicklung. Kurzbericht (bearbeitet von J. Gausemeier und A. Fink), Paderborn: H. Nixdorf Institut 1997.
- [24] Grabowski, H., Geiger, K. (Hg.): Neue Wege zur Produktentwicklung, Stuttgart: RAABE, 1997.

Stefan H. E. Kaufmann

Infektabwehr gegen intrazelluläre Bakterien: Von der Entdeckung des Tuberkuloseerregers bis zur Aufklärung der zellulären Immunmechanismen

*(Vortrag in der Sitzung der Biowissenschaftlich-medizinischen Klasse
am 26. Juni 1997)*

Einleitung

Als Robert Koch am 24. März 1882 in Berlin erstmals öffentlich über die Entdeckung des Tuberkuloseerregers berichtete, hatte er den bedeutendsten Vertreter einer Gruppe medizinisch wichtiger bakterieller Krankheitserreger identifiziert (Abb. 1) [1]. Zu Robert Kochs Zeiten war dieser Erreger für mehr als 20 % aller Todesfälle verantwortlich. Seitdem ist die Bedrohung in dieser Stadt und der gesamten westlichen Welt deutlich zurückgegangen. Dennoch erkrankten allein in Deutschland 1996 mehr als 12.000 Menschen an Tuberkulose. Weltweit ist die Situation so dramatisch, daß sich die Weltgesundheitsbehörde 1993 veranlaßt sah, den Tuberkulosenotstand auszurufen. Am Tuberkuloseerreger sterben weltweit mehr Menschen als an irgendeinem anderen Krankheitserreger, jährlich sind 8 Mio. Neuerkrankungen zu verzeichnen, und 60 Mio. sind derzeit an Tuberkulose erkrankt [2]. Man könnte annehmen, daß das Immunsystem unfähig ist, die Tuberkulose zu verhindern. Andererseits wissen wir heute, daß knapp 2 Mrd. Menschen – also etwa ein Drittel der gesamten Weltbevölkerung – mit dem Tuberkuloseerreger infiziert sind. Somit erkrankt nur ein außerordentlich geringer Teil – weit weniger als 10 % der Infizierten – an Tuberkulose. Hieraus läßt sich für den Immunologen ableiten, daß das Immunsystem der meisten Infizierten den Erreger effektiv kontrolliert. Bildhaft lassen sich diese beiden Aspekte am besten in Form einer Waage darstellen. Bei den meisten Infizierten stellt sich zwischen den körpereigenen Abwehrkräften und dem Erreger ein labiles Gleichgewicht ein, das über Jahrzehnte unverändert ausgewogen bleibt. Nur bei wenigen senkt sich die Waage zugunsten des Erregers, und es entwickelt sich eine klinische Erkrankung. Typischerweise entsteht die Erkrankung nach Schwächung des körpereigenen Immunsystems, wie es dramatisch an der hohen Inzidenz an Tuberkulosekranken unter HIV-Infizierten illustriert wird. Prinzipiell ist schließlich möglich, daß sich das Gleichgewicht

Die Berliner Klinische Wochenschrift erscheint jeden Montag in der Größe von ungefähr 32 Bogen zu 4. Preis vierteljährlich 3 Mark. Bestellungen nehmen alle Buchhandlungen und Post-Anstalten an.

Druckungen wolle man bestellen bei G. Reimerstr. 17, oder bei der Verlagshandlung von August Hirschwald in Berlin (K. W. Unter den Linden 52) übertragen.

BERLINER KLINISCHE WOCHENSCHRIFT.

Organ für practische Aerzte.

Mit Berücksichtigung der preussischen Medicinalverwaltung und Medicinalgesetzgebung nach amtlichen Mittheilungen.

Redacteur: Professor Dr. C. A. Knack

Verlag von August Hirschwald in Berlin.

Montag, den 10. April 1882.

Nr. 15.

Neunzehnter Jahrgang.

Inhalt: I. Koch: Die Aetiologie der Tuberculose. — II. Müller: Ueber einen Fall von Wandepider. — III. Küster: Ueber antiseptische Putzverfahren (Schluss). — IV. Verhandlungen ärztlicher Gesellschaften (Berliner medicinische Gesellschaft). — V. Puffenberger (Maximaltabelle der Pharmazopica Germanica, ed II. — VI. Amthelche Mittheilungen. — Inserate.

I. Die Aetiologie der Tuberculose.

(Nach einem in der physiologischen Gesellschaft zu Berlin am 24. März cr. gehaltenen Vortrag.)

von
Dr. Robert Koch,

Regierungsrath im Kaiserl. Gesundheitsamt.

Die von Villémín gemachte Entdeckung, dass die Tuberculose auf Thiere übertragbar ist, hat bekanntlich vielfache Bestätigung, aber auch anscheinend wohlgegründeten Widerspruch gefunden, so dass es bis vor wenigen Jahren unentschieden bleiben musste, ob die Tuberculose eine Infektionskrankheit sei oder nicht. Seitdem haben ausser die zuerst von Cobnheim und Salomonsen, später von Baumgarten ausgeführten Impfungen in die vordere Augenkammer, ferner die Inhalationsversuche von Tappeiner und Andren die Uebertragbarkeit der Tuberculose gegen jeden Zweifel sicher gestellt und es muss ihr in Zukunft ein Platz unter den Infektionskrankheiten angewiesen werden.

Wenn die Zahl der Opfer, welche eine Krankheit fordert, als Massstab für ihre Bedeutung zu gelten hat, dann müssen alle Krankheiten, namentlich aber die gefährlichsten Infektionskrankheiten, Pest, Cholera u. s. w. weit hinter der Tuberculose zurückstehen. Die Statistik lehrt, dass 1/3 aller Menschen an Tuberculose stirbt und dass, wenn nur die mittleren productiven Altersklassen in Betracht kommen, die Tuberculose ein Drittel derselben und oft mehr dahinführt. Die öffentliche Gesundheitspflege hat also Grund genug, ihre Aufmerksamkeit einer so widerwärtigen Krankheit zu widmen, ganz abgesehen davon, dass noch andere Verhältnisse, von denen nur die Beziehungen der Tuberculose zur Posaicht erwähnt werden sollen, das Interesse der Gesundheitspflege in Anspruch nehmen.

Da es nun zu den Aufgaben des Gesundheitsamtes gehört, die Infektionskrankheiten vom Standpunkte der Gesundheitspflege aus, also in erster Linie in Bezug auf ihre Aetiologie, zum Gegenstand von Ermittlungsarbeiten zu machen, so erschien es als eine dringende Pflicht, vor Allen über die Tuberculose eingehende Untersuchungen anzustellen.

Das Wesen der Tuberculose zu ergründen, ist schon wiederholt versucht, aber bis jetzt ohne Erfolg. Die zum Nachweis der pathogenen Microorganismen so vielfach bewährten Färbungsverfahren haben dieser Krankheit gegenüber im Stich gelassen

und die zum Zwecke der Isolirung und Züchtung des Tuberkel-Virus angestellten Versuche konnten bis jetzt nicht die gelungene angesehen werden, so dass Cobnheim in der soeben erschienenen neuesten Auflage seiner Vorlesungen über Allgemeine Pathologie „den directen Nachweis des tuberculösen Virus als ein bis heute noch ungelöstes Problem“ bezeichnen musste.

Bei meinen Untersuchungen über die Tuberculose habe ich mich anfangs nach der bekannten Methoden bedient, ohne damit eine Aufklärung über das Wesen der Krankheit zu erlangen. Aber durch einige gelegentliche Beobachtungen wurde ich dann veranlasst, diese Methoden zu verlassen und andere Wege einzuschlagen, die schliesslich auch zu positiven Resultaten führten.

Das Ziel der Untersuchung musste zunächst auf den Nachweis von irgend welchen, dem Körper fremdartigen, parasitischen Gebilden gerichtet sein, die möglicherweise als Krankheitsursache gedeutet werden konnten. Dieser Nachweis gelang auch in der That durch ein bestimmtes Färbungsverfahren, mit Hilfe dessen in allen tuberculös veränderten Organen charakteristische, bis dahin nicht bekannte Bacterien zu finden waren. Es würde zu weit führen, den Weg, auf welchem ich zu diesem neuen Verfahren gelangte, zu schildern und ich will deswegen sofort zur Beschreibung desselben übergehen.

Die Untersuchungsobjecte werden in der bekannten, für Untersuchungen auf pathogene Bacterien üblichen Weise, vorbereitet und entweder auf dem Deckglas ausgebreitet, getrocknet und erhärtet, oder nach Erhärtung in Alkohol in Schmitte zerlegt. Die Deckgläschen oder Schmitte gelangen in eine Farblösung von folgender Zusammensetzung: 200 Ccm. destillirten Wassers werden mit 1 Ccm. einer concentrirten Alcoholischen Methylenblau-Lösung versetzt, umgeschüttelt und erhalten dann unter wiederholtem Schütteln noch einen Zusatz von 0,2 Ccm. einer 10%, Kalklösung. Diese Mischung darf selbst nach erfolgtem Stehen keinen Niederschlag geben. Die zu färbenden Objecte bleiben in derselben 20 bis 24 Stunden. Durch Erwärmen der Farblösung auf 40° C. im Wasserbade kann diese Zeit auf 1 bis 1 1/2 Stunde abgekürzt werden. Die Deckgläschen werden hierauf mit einer concentrirten wässrigen Lösung von Yerspin, welche vor jedesmaligem Gebrauche zu filtriren ist, übergossen und nach ein bis zwei Minuten mit destillirtem Wasser abgepült. Wenn die Deckgläschen aus dem Methylenblau kommen, sieht die ihnen anhaftende Schicht dunkelblau aus und ist stark

Abb. 1

Erstbeschreibung des Tuberkuloseerregers durch Robert Koch im Jahr 1882. Die Arbeit erschien in der Berliner Klinischen Wochenschrift Nr. 15/10 vom 10. April 1882.

zugunsten des Infizierten verschiebt und dem körpereigenen Abwehrsystem die Ausrottung der Erreger gelingt. Hierüber sind jedoch kaum Daten vorhanden, und wir müssen annehmen, daß dies ein seltenes Ereignis darstellt. Eine Verschiebung in diese Richtung muß aber das Ziel einer effektiven Impfstoffstrategie sein [3].

Aus dem Gesagten läßt sich ableiten, daß der Schlüssel zum Verständnis der Folgen einer Infektion mit dem Tuberkuloseerreger in der Immunantwort zu suchen ist. Eine Klärung der Immunmechanismen, die gegen das Tuberkelbakterium gerichtet sind, ermöglicht nicht nur ein tieferes Verständnis der antiinfektiösen Immunantwort, sondern kann auch neue Wege zu Therapie und Prävention aufweisen. Da Untersuchungen mit dem Tuberkuloseerreger außerordentlich aufwendig sind, müssen in vielen Fällen auch Infektionen mit anderen Pathogenen aus der Gruppe der intrazellulären Bakterien herangezogen werden.

Makrophagen als Lebensraum der intrazellulären Bakterien

In Tabelle 1 sind medizinisch wichtige Mitglieder der Gruppe der intrazellulären Bakterien zusammengefaßt. Wie der Name bereits andeutet, halten sich intrazelluläre Bakterien bevorzugt innerhalb von Wirtszellen auf [4]. Dabei haben sie sich eine Zelle als Lebensraum ausgesucht, die für die Infektabwehr bestens gerüstet ist: den mononukleären Phagozyten. Solange sich Gewebsmakrophagen im Ruhe-

Erreger	Krankheitsbild	Eintrittspforte	Bevorzugte Wirtszelle	Intrazelluläre Lokalisation	Hauptsächlich aktivierte T-Zelle
<i>Salmonella enterica</i>	Typhus	Darm	Makrophage	Phagosom	CD4 T-Zelle
<i>Listeria monocytogenes</i>	Listeriose	Darm	Makrophage/ Hepatozyt	Zytoplasma	CD8 T-Zelle
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Tuberkulose	Lunge	Makrophage	Phagosom	CD4 und CD8 T-Zelle
<i>Mycobacterium leprae</i>	Lepra	Haut, Schleimhaut	Makrophage, Schwann-Zelle	Phagosom	CD4 und CD8 T-Zelle
<i>Mycobacterium bovis</i> BCG	Tuberkulose- Impfstoff	Injektionsstelle	Makrophage	Phagosom	CD4 T-Zelle

Tabelle 1
Medizinisch wichtige intrazelluläre Bakterien

zustand befinden, sind sie außerstande, ihre intrazellulären Parasiten zu eliminieren. Dies ist darauf zurückzuführen, daß intrazellulär vitale Bakterien Strategien entwickelt haben, welche die antimikrobiellen Effektorfunktionen des ruhenden Makrophagen aktiv hemmen oder ein Entgleiten des Keims ermöglichen. Die meisten intrazellulären Bakterien besitzen die Fähigkeit, im Phagosom zu überleben [5]. Wenn ein Makrophage einen inerten Partikel gefressen hat, so reift das umgebende Phagosom heran, und es bildet sich schließlich ein Phagolysosom, das einen unwirtlichen Lebensraum bietet. Die meisten intrazellulären Bakterien aber arretieren die Phagolysosomenreifung, so daß sie in einem weniger gefährlichen Milieu persistieren können. Diesen Mechanismus nutzen zum Beispiel *M. tuberculosis*, *Salmonella enterica* und *Legionella pneumophila*. *Listeria monocytogenes* hat dagegen eine andere Strategie entwickelt. Dieser Keim sezerniert im frühen Phagosom Listeriolysin, das die Zellmembran lysiert. Auf diese Weise gelingt es Listerien, in das Zytoplasma zu entweichen. Aktivierte Makrophagen besitzen dagegen die Fähigkeit, das Wachstum intrazellulärer Bakterien einzudämmen oder diese vollständig zu eliminieren. Die Aktivierung wird durch Zytokine ausgelöst, die insbesondere von spezifischen T-Lymphozyten gebildet werden. An erster Stelle ist Interferon- γ (IFN- γ) zu nennen, obwohl auch andere Zytokine, wie zum Beispiel das Makrophagenprodukt Tumor-Nekrose-Faktor- α (TNF- α), zur Makrophagenaktivierung beitragen [6].

Intrazellulärer Lebensraum und T-Zellaktivierung

Die Population der T-Lymphozyten besteht aus mehreren Subpopulationen [7]. Die bedeutendste Population sind die α/β T-Zellen, welche zur Antigenerkennung einen T-Zellrezeptor (TZR) nutzen, der aus einer α - und einer β -Kette besteht. Der α/β TZR sieht ein mikrobielles Peptid im Kontext einer körpereigenen Referenzstruktur, die von Genen des Haupthistokompatibilitätskomplexes (engl.: major histocompatibility complex, kurz: MHC) kodiert wird. Die CD4 T-Zellen sind MHC Klasse II und die CD8 T-Zellen sind MHC Klasse I restringiert (Abb. 2). Das MHC Klasse II Molekül „pendelt“ zwischen Phagosom und Zelloberfläche und ist daher für die Präsentation von Peptiden aus dem Phagosom verantwortlich. Dagegen „pendeln“ die MHC Klasse I Moleküle zwischen endoplasmatischem Retikulum (ER) und Zelloberfläche. Die im Zytoplasma vorhandenen Proteine werden durch Proteasomen degradiert, und die entstandenen Peptide werden von einem spezialisierten Transportsystem (transporters associated with antigen processing, kurz: TAP) ins ER gebracht, von wo sie von MHC Klasse I Genprodukten auf die Zelloberfläche befördert werden. Auf diese Weise bestimmt die intrazelluläre Antigenlokalisation den Phänotyp der aktivierten T-Zellen (siehe Tabelle 1). Infolgedessen aktivieren

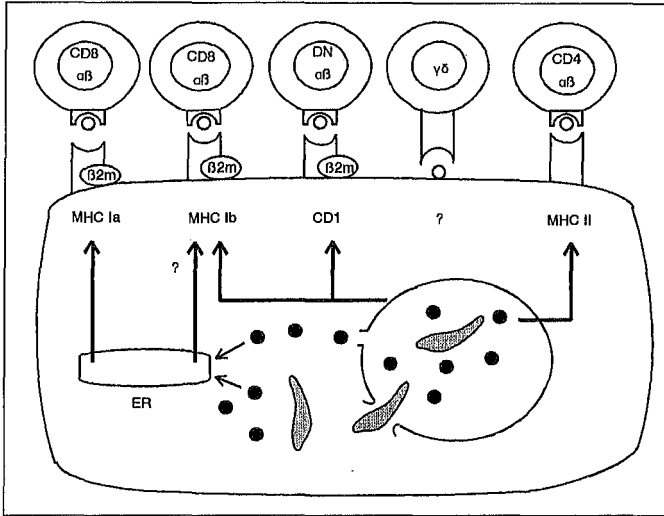


Abb. 2

Konventionelle und unkonventionelle T-Zellen bei der antibakteriellen Infektabwehr. Das Schema zeigt die unterschiedlichen Prozessierungswege für die verschiedenen T-Zellpopulationen.

„phagosomale“ Bakterien, wie *S. enterica*, primär CD4 T-Zellen und „zytoplasmatische“ Erreger, wie *L. monocytogenes*, hauptsächlich CD8 T-Lymphozyten.

Die unterschiedliche Aktivierung von CD4 bzw. CD8 T-Lymphozyten beeinflusst auch die Rolle der jeweiligen T-Zellpopulation am erworbenen Schutz. Diese Feststellung wird durch Experimente mit Mäusemutanten mit definiertem Gendefekt eindrücklich belegt. Mausmutanten mit defektem MHC Klasse II Ketten-Gen besitzen keine konventionellen CD4 T-Zellen, während Mausmutanten mit defektem β 2-Mikroglobulin (β 2M)-Gen keine MHC Klasse I Moleküle auf der Zelloberfläche exprimieren und demzufolge keine konventionellen CD8 T-Zellen besitzen. Der Infektionsverlauf mit *M. bovis* BCG oder mit *S. enterica* wird durch den CD8 T-Zelldefekt kaum beeinflusst, während bereits niedrige Dosen dieses phagosomalen Krankheitserregers für CD4 T-Zell-defiziente Tiere letal sind [8, 9]. Umgekehrt sind CD8 T-Zell-defiziente Mäuse gegenüber einer *L. monocytogenes*-Infektion außerordentlich empfindlich, während die CD4 T-Zell-defizienten Tiere diesen Erreger bedingt kontrollieren können [10]. Eine Infektion mit *M. tuberculosis* können dagegen weder CD4 noch CD8 T-Zell-defiziente Mäuse effektiv bekämpfen [11 und Ladel et al., unveröffentlicht]. Hierzu werden sowohl CD4 als auch CD8 T-Lymphozyten benötigt.

Alternative Wege der MHC Klasse I Prozessierung vom Phagosom aus

Obwohl sich *M. tuberculosis* mit aller Wahrscheinlichkeit im Phagosom aufhält und nicht in das Zytoplasma entweichen kann, werden Erregerantigene über den MHC Klasse I Weg präsentiert, so daß bei immunkompetentem Status CD8 T-Zellen stimuliert werden können [6]. Man muß jedoch befürchten, daß die CD8 T-Zellaktivierung bei der Tuberkulose ungenügend ist, und daher eine Diskrepanz zwischen der Fähigkeit zur CD8 T-Zellaktivierung und der Bedeutung dieser T-Zellpopulation für die protektive Immunantwort besteht. Dies könnte ein Grund dafür sein, daß *M. tuberculosis* selbst im Immunkompetenten nicht vollständig ausgerottet wird. Dieses Mißverhältnis könnte auch die ungenügende Effektivität des derzeit verfügbaren Impfstoffs *M. bovis* Bacille Calmette Guérin (BCG) zumindest teilweise erklären [12]. Dieser Keim verweilt im Phagosom und stimuliert fast ausschließlich CD4 T-Zellen. Während BCG eine disseminierte Tuberkulose im Kleinkind eindämmen kann, besitzt der Impfstoff nicht die Fähigkeit, die Reaktivierung einer Tuberkulose im Erwachsenenalter zu verhindern. Man nimmt an, daß der erstgenannte Krankheitsverlauf im wesentlichen von CD4 T-Lymphozyten kontrolliert wird, während für die Kontrolle des Krankheitsbilds in Erwachsenen zusätzlich auch CD8 T-Lymphozyten benötigt werden.

Für weitergehende Untersuchungen zur möglichen Beziehung zwischen intrazellulärer Lokalisation und Beteiligung der aktivierten T-Zellsubpopulationen am Schutz wurden rekombinante *S. enterica*-Stämme konstruiert, welche definierte Listerienproteine sezernieren [13]. Als Listerienproteine wurden gewählt: (1) das an der Bakterienteilung und möglicherweise auch an der Zelladhäsion beteiligte Protein p60 und (2) das bereits erwähnte Listeriolysin, welches für die Auswanderung aus dem Phagosom in das Zytoplasma verantwortlich ist. Beide Proteine sind dominante Antigene listerienspezifischer CD8 T-Zellen. Während aber Listeriolysin einen dramatischen Einfluß auf die intrazelluläre Lebensweise hat, kann Entsprechendes für p60 mit aller Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Mit Hilfe des *Escherichia coli*-Hämolyysin-Transportsystems werden diese Proteine von *r-S. enterica*-Stämmen sezerniert und der MHC-Prozessierung unterworfen. Elektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen, daß listeriolysinexprimierende *r-S. enterica*-Stämme die Fähigkeit erworben haben, aus dem Phagosom in das Zytoplasma auszuwandern [14]. Infektionsversuche mit Kontrollstämmen und diesen listeriolysinsezernierenden *r-S. enterica*-Stämmen ergaben aber, daß die zytoplasmatische Lokalisation nur einen schwachen Einfluß auf den Infektionsverlauf hat. Selbst in CD8 T-Zell-defizienten Mäusemutanten ist der Krankheitsverlauf kaum von dem des Kontrollstamms zu unterscheiden. Daraus läßt sich ableiten, daß die zytoplasmatische Lokalisation für *S. enterica* keinen weiteren Überlebensvorteil bietet.

In darauf folgenden Experimenten wurde versucht, mit den *r-S. enterica*-Stämmen, die definierte Listerienproteine sezernieren, Schutz gegen eine nachfolgende *L. monocytogenes*-Infektion zu erzielen. Sowohl p60- als auch listeriolysinexprimierende *r-S. enterica*-Stämme waren in der Lage, Impfschutz gegen Listerien hervorzurufen. Für beide Antigene konnten Hinweise erbracht werden, daß daran CD8 T-Lymphozyten beteiligt sind. Hieraus kann abgeleitet werden, daß nicht nur die in das Zytoplasma ausgewanderten, sondern auch die im Phagosom verbleibenden Impfstämme die Fähigkeit besitzen, protektive CD8 T-Lymphozyten zu aktivieren. Wahrscheinlich wurden p60-Moleküle, die in das phagosomale Milieu sezerniert wurden, in das Zytoplasma transportiert, von wo aus die Antigenbeladung der MHC Klasse I Moleküle erfolgen konnte (Abb. 3). Inwieweit hieran salmonellen-spezifische Faktoren oder wirtseigene Mechanismen beteiligt waren, bedarf der weiteren Klärung. Es ist anzunehmen, daß vergleichbare Mechanismen bei der CD8 T-Zellaktivierung durch *M. tuberculosis* wirksam werden.

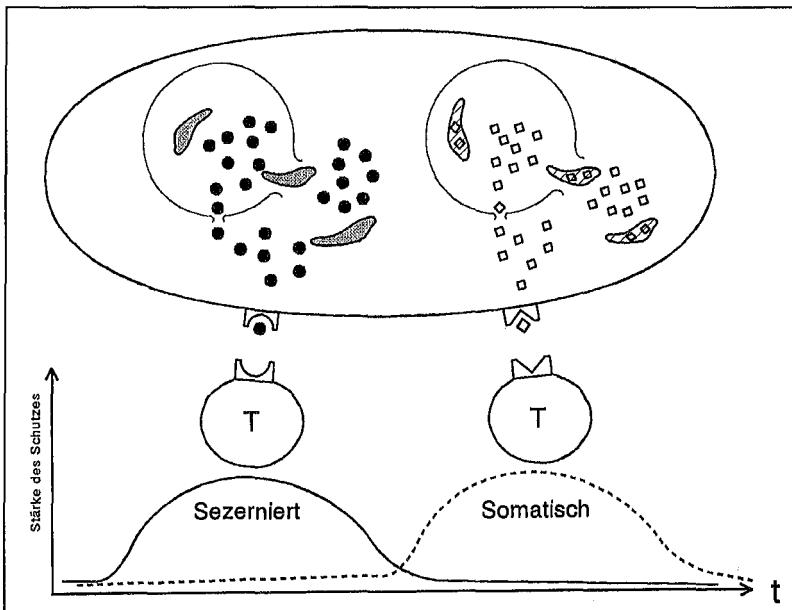


Abb. 3

Einfluß von intrazellulärer Lokalisation und Antigen darbietung auf den Impfschutz. Sezernierte Proteine werden früher als somatische Proteine prozessiert. Daher können T-Zellen mit Spezifität für sezernierte Antigene früher aktiviert werden als T-Zellen mit Spezifität für somatische Antigene.

Einfluß der Antigen darbietung auf die Impfstärke

Es wurden *r-S. enterica*-Stämme konstruiert, welche die Listerienproteine p60 und Listeriolysin im Zellinneren exprimieren [13]. Dies gelang durch genetische Deletion einer Komponente des *E. coli*-Hämolyisin-Transportsystems. Somit waren *r-S. enterica*-Stämme verfügbar, die Listeriolysin bzw. p60 in somatischer oder sezernierter Form darboten. Wie bereits gesagt, konnte mit den sezernierenden Impfstämmen ein deutlicher Schutz gegen eine nachfolgende Listerieninfektion hervorgerufen werden. Dagegen gelang dies mit Impfstämmen, welche dieselben Antigene im Soma exprimierten, nicht. Der Antigen darbietung muß daher ein wesentlicher Einfluß auf die Impfstärke zugesprochen werden. Sezernierte Antigene können bereits im ruhenden Makrophagen prozessiert und T-Lymphozyten angeboten werden. Dagegen stehen somatische Proteine erst zur Verfügung, nachdem die Bakterien abgetötet und abgebaut wurden (siehe Abb. 3). Dies gelingt aber erst dem aktivierten Makrophagen. Sezernierte Proteine stehen daher bereits während der Frühphase der Infektion als Antigene zur Verfügung, während somatische Antigene erst zu späteren Zeiten verfügbar werden. Somit stellt die Proteinsekretion einen wichtigen Parameter für die Impfstärke bakterieller Lebendimpfstoffe dar.

MHC Klasse Ib-abhängige CD8 α/β T-Zellen

Obwohl die konventionellen CD4 und CD8 T-Lymphozyten den wesentlichen Anteil am erworbenen Schutz tragen, haben Befunde aus neuerer Zeit Hinweise dafür erbracht, daß zusätzlich auch unkonventionelle T-Lymphozytenpopulationen an der Infektabwehr gegen intrazelluläre Bakterien beteiligt sind [7]. So wurden CD8 T-Lymphozyten aus listerieninfizierten Mäusen isoliert, die nicht der klassischen MHC Klasse I Restriktion unterlagen [15]. Diese CD8 T-Lymphozyten erkennen Peptide, die durch eine N-formyl-Methionin (N-f-Met)-Sequenz charakterisiert sind und von nichtklassischen MHC Klasse Ib Molekülen präsentiert werden [16]. Während diese N-f-Met-Peptide bei Prokaryonten weitverbreitet sind, findet man sie bei Säugerzellen lediglich in Mitochondrien, die von Prokaryonten abstammen. Die MHC Klasse Ib Genprodukte sind mit den klassischen MHC Klasse I Molekülen verwandt. Sie sind aber im Gegensatz zu diesen nicht polymorph verbreitet. Weiterhin findet die Beladung dieser MHC Klasse Ib Moleküle mit bakteriellen N-f-Met-Peptiden im Phagosom statt. Die N-f-Met-spezifischen CD8 T-Lymphozyten sind in der Lage, adaptiv Schutz gegen Listerien zu übertragen. Darüber hinaus gelingt es, durch Mehrfachimpfung mit abgetöteten Listerien Schutz gegen

eine nachfolgende Infektion mit lebenden *L. monocytogenes*-Organismen hervorzurufen [17]. Über dieses Präsentationssystem können daher CD8 T-Lymphozyten vom Phagosom aus aktiviert werden, Schutz zu vermitteln (siehe Abb. 2).

CD1-abhängige doppeltnegative (DN) α/β T-Zellen

Im Humansystem konnten DN T-Lymphozyten von ungewöhnlicher Spezifität isoliert werden [18]. Diese T-Lymphozyten reagieren nämlich mit mykobakteriellen Lipiden, welche von CD1 Molekülen präsentiert werden [19, 20]. Die CD1 Moleküle haben eine entfernte Ähnlichkeit mit MHC Klasse I Genprodukten und sind nicht polymorph verteilt. Bei den bislang identifizierten Liganden handelt es sich um Lipoarabinomannan und Mykolsäuren pathogener Mykobakterien. Bemerkenswerterweise findet die Lipoidbeladung der CD1 Moleküle im Phagosom statt (siehe Abb. 2). Da entsprechende T-Lymphozyten im Experimentaltier bislang nicht identifiziert wurden, ist eine endgültige Aussage über die Bedeutung dieser ungewöhnlichen T-Zellpopulation für den antibakteriellen Schutz derzeit nicht möglich. *In vitro* produzieren diese T-Lymphozyten aber IFN- γ und besitzen somit eine wesentliche Fähigkeit protektiver T-Lymphozyten.

γ/δ T-Zellen

Eine kleine Population im peripheren Blut und den lymphatischen Organen bei Mensch und Maus exprimiert einen alternativen TZR, der aus einer γ - und einer δ -Kette besteht [21]. Mausmutanten, denen γ/δ T-Lymphozyten fehlen, zeigen eine erhöhte Suszeptibilität gegenüber hohen Dosen von *M. tuberculosis* [22]. An der Infektabwehr gegen Listerien sind γ/δ T-Lymphozyten ebenfalls beteiligt, wenn auch in geringerem Maße. Interessanterweise entwickeln sich in γ/δ T-zelldefizienten Tieren Abszesse statt der für intrazelluläre bakterielle Infektionen typischen Granulome [23]. Dies deutet auf eine regulatorische Funktion der γ/δ T-Zellen bei der Granulombildung hin. Humane γ/δ T-Lymphozyten werden durch niedermolekulare Bestandteile von Mykobakterien *in vitro* deutlich stimuliert. Hierbei handelt es sich um phosphathaltige temperatur- und proteaseresistente Materialien. Mit Isopentenylpyrophosphat und verwandten Alkylderivaten wurden die ersten natürlichen Liganden für γ/δ T-Lymphozyten identifiziert [24]. Diese Phospholiganden werden, unabhängig von den bekannten antigenpräsentierenden Molekülen, auf der Zelloberfläche dargeboten und möglicherweise direkt von γ/δ T-Lymphozyten erkannt (siehe Abb. 2). Obwohl der TZR an der Ligandenerkennung beteiligt ist, kommt es zu einer oligoklonalen Aktivierung. Die γ/δ T-Lymphozyten, die eine bestimmte TZR-Kettenkombination aus V γ 2/V δ 2 exprimieren, werden

unabhängig von ihrer Feinspezifität stimuliert. Die $V\gamma 2/V\delta 2$ T-Lymphozyten sind die bedeutendste Population der peripheren γ/δ T-Zellen. Selbst wenn γ/δ T-Lymphozyten lediglich 5 bis 10 % aller peripheren Blut T-Lymphozyten ausmachen, werden daher durch Phospholiganden ca. 1–3 % aller peripheren T-Lymphozyten stimuliert. Dies sind zehnfach bis hundertfach mehr Zellen als klonal aktivierte antigenspezifische α/β T-Zellen.

*Warum werden so viele verschiedene T-Zellpopulationen
bei bakteriellen Infektionen aktiviert?*

Zwar wird die Bedeutung der unkonventionellen T-Lymphozyten noch ungenügend verstanden. Die Bevorzugung mikrobieller Liganden durch einige T-Zellpopulationen wirft jedoch die Frage nach den Ursachen ihres Vorhandenseins auf. Zum ersten muß festgestellt werden, daß zumindest die DN α/β T-Zellen und die γ/δ T-Zellen das Dogma, daß der TZR exklusive Spezifität für Peptide im Kontext von MHC Molekülen besitze, erschüttern. Es ist sicher kein Zufall, daß die CD1-kontrollierten DN α/β T-Zellen des Menschen und die MHC Klasse Ib-kontrollierten CD8 T-Zellen der Maus bakterientypische Liganden erkennen. Vielmehr deutet dies daraufhin, daß sich diese T-Zellen als spezialisierte Abwehrzellen in koevolutionärer Auseinandersetzung mit den entsprechenden Krankheitserregern entwickelt haben. Diese T-Zellen werden von Referenzstrukturen kontrolliert, die im Gegensatz zu den klassischen MHC Molekülen nicht polymorph exprimiert werden. Somit entfällt für diese Zellen, wie auch für die γ/δ T-Zellen, die Phospholiganden direkt erkennen, die Restriktion auf autologe Zellen. Der hohe MHC Polymorphismus wird allgemein als wichtiges Schutzprinzip angesehen. Die Präsentation unterschiedlicher Erregerpeptide in verschiedenen Individuen wirkt der Möglichkeit entgegen, daß Mikroben durch Punktmutationen einer Erkennung entgehen. Auf Populationsebene wird es trotz zahlreicher Erreger-Mutationen immer wieder Individuen geben, deren Immunsystem einen unveränderten Bereich des bakteriellen Genprodukts erkennt. Für Impfstoffe ist der geringe Polymorphismus der CD1 und MHC Klasse Ib Moleküle von großem Vorteil, da der identische Ligand in allen Individuen einer Population erkannt und somit für Impfungen genutzt werden kann. Beim γ/δ T-Lymphozyten-stimulierenden Isopentenylpyrophosphat handelt es sich dagegen um einen ubiquitär bei Pro- und Eukaryonten vorkommenden Metaboliten. γ/δ T-Lymphozyten üben wahrscheinlich eher modulierende Regulatorfunktionen aus, so daß die Erkennung kreuzreaktiver Liganden keine dramatischen Konsequenzen hat. Vielmehr ermöglicht die Erkennung derartiger Strukturen, daß Entzündungsprozesse, unabhängig davon, ob sie endogenen oder exogenen Ursprungs sind, durch γ/δ T-Zellen moduliert werden.

Die unterschiedlichen konventionellen und unkonventionellen T-Lymphozyten besitzen alle die Fähigkeit, nach Stimulation $\text{IFN-}\gamma$ zu produzieren. Sie erfüllen somit ein wichtiges Charakteristikum protektiver T-Lymphozyten. Es ist anzunehmen, daß sich diese unterschiedlichen T-Zellpopulationen funktionell nicht dramatisch unterscheiden. Vielmehr ist ihre Einzigartigkeit in der Art ihrer Antigenerkennung und -aktivierung zu suchen. Während die Antigenbeladung von MHC Klasse II, MHC Klasse Ib und CD1 im Phagosom erfolgt, findet der Kontakt zwischen bakteriellem Antigen und MHC Klasse I im ER statt. Somit führen unterschiedliche Prozessierungswege vom Phagosom zur T-Zelle. Während die klassischen MHC Klasse I Moleküle auf fast allen Körperzellen exprimiert werden, sind MHC Klasse II, MHC Klasse Ib und CD1 Moleküle nur auf einigen Zellen zu finden. Daher können MHC Klasse I kontrollierte CD8 T-Zellen ein weit größeres Spektrum an infizierten Zellen erkennen. Obwohl Makrophagen die bevorzugten Wirtszellen für intrazelluläre Bakterien darstellen, findet man Erreger vereinzelt auch in anderen Wirtszellen. Die Erkennung von MHC Klasse I Genprodukten verhindert, daß diese Zellen längerfristig von intrazellulären Bakterien als Nische mißbraucht werden. Hinzu kommt, daß in diesen Zellen antibakterielle Abwehrmechanismen im allgemeinen nicht aktiviert werden. Daher könnte die Fähigkeit der CD8 T-Zellen, Wirtszellen zu lysieren, einen Beitrag zum antibakteriellen Schutz leisten. Durch diese Zerstörung können Bakterien freigesetzt und von Monozyten phagozytiert werden, in denen maximale antibakterielle Aktivitäten stimuliert werden können.

Die Rolle von Zytokinen

Die Infektion mit intrazellulären Bakterien läßt sich zwanglos in drei Abschnitte unterteilen (Abb. 4) [25]. In jedem Abschnitt übernehmen Zytokine zwei wesentliche Aufgaben. Zum ersten lösen sie Effektorfunktionen aus, die das Bakterienwachstum eindämmen; zum zweiten regulieren Zytokine den weiteren Infektionsverlauf. Während der frühen Phase der Infektion werden hauptsächlich proinflammatorische Zytokine wie Interleukin (IL)-1, IL-6 und $\text{TNF-}\alpha$ sowie Chemokine gebildet, welche Phagozyten an den Ort der bakteriellen Absiedlung locken [26, 27]. Die angelockten Phagozyten hemmen das Bakterienwachstum, sind aber im allgemeinen nicht zur sterilen Elimination intrazellulärer Krankheitserreger befähigt. Während dieser frühen Phase werden auch regulatorische Zytokine gebildet. Insbesondere ist hier IL-12 zu nennen, das von infizierten Makrophagen sezerniert wird und entscheidend die folgenden Phasen der Infektion beeinflusst [28]. IL-12 ist ein potenter Induktor der für die antibakterielle Abwehr wesentlichen T-Zellen, welche $\text{IFN-}\gamma$ produzieren und zytolytische Aktivität exprimieren. Während der Intermediärphase dominieren natürliche Killerzellen und γ/δ T-Zellen,

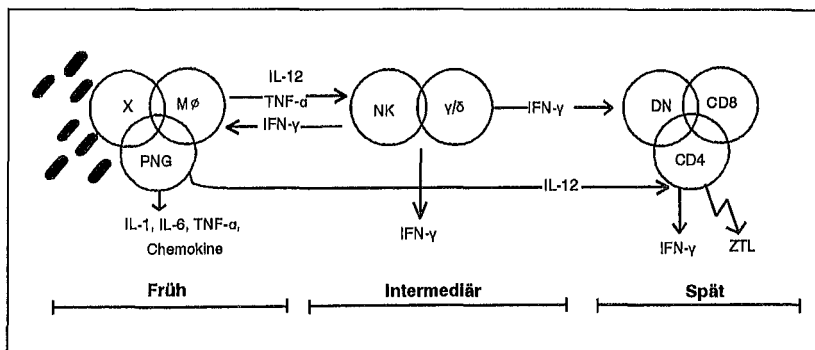


Abb. 4

Die drei Phasen der Infektabwehr gegen intrazelluläre Bakterien. Das Schema zeigt die wesentlichen Zellen und Zytokine sowie ihre regulatorischen und Effektorfunktionen.

die unter dem Einfluß von IL-12 rasch zu potenten IFN- γ -Produzenten heranreifen. IFN- γ ist erstens der bedeutendste Makrophagenaktivator und somit für die antibakterielle Infektabwehr von entscheidender Bedeutung [29]. Zweitens fördert IFN- γ die Reifung der IFN- γ sezernierenden T-Zellen. Auf diese Intermediärphase folgt die späte Phase, die von den T-Zellen der erworbenen Immunität geprägt wird, also den konventionellen CD4 und CD8 α/β T-Zellen sowie den MHC Klasse Ib-kontrollierten CD8 T-Zellen, die alle IFN- γ produzieren. Obwohl unklar ist, in welcher Phase DN α/β T-Zellen aktiviert werden, ist anzunehmen, daß auch sie an der erworbenen Immunphase beteiligt sind.

Das Granulom

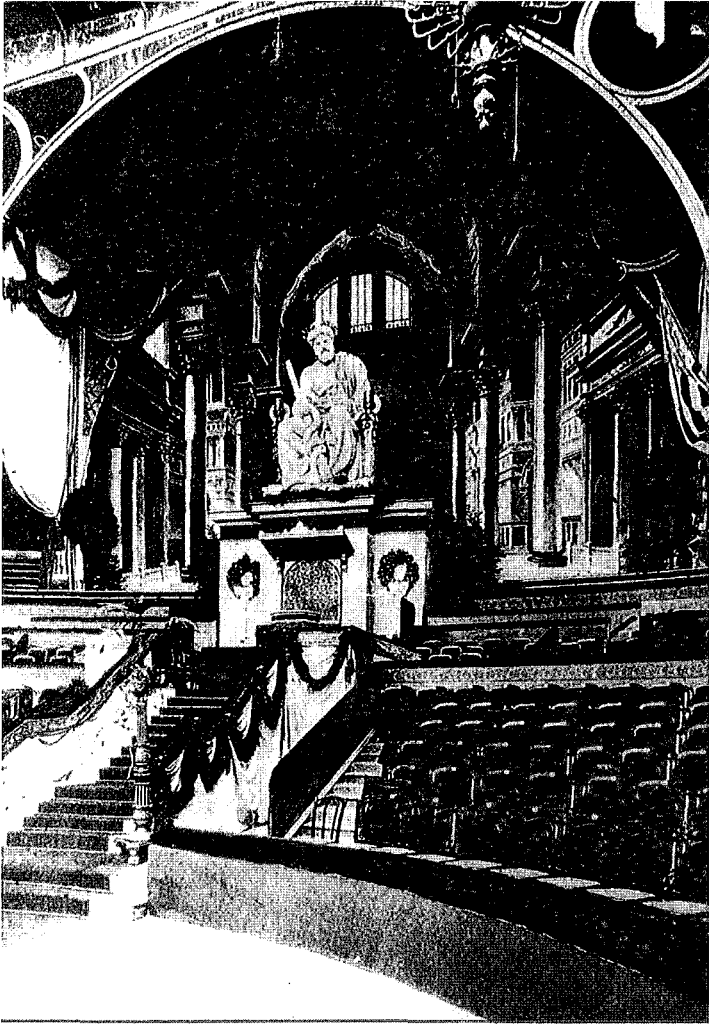
Im Verlauf der Infektion mit intrazellulären Bakterien entwickelt sich am Ort der bakteriellen Absiedlung ein Granulom, in dem T-Lymphozyten und Makrophagen in engen und geordneten Kontakt treten [30]. Die Konzentration auf gut umschriebene Foci ermöglicht zum einen den engen Kontakt zwischen unterschiedlichen T-Lymphozytenpopulationen und mononukleären Phagozyten und konzentriert somit die immunologischen Abwehrkräfte. Zum anderen bewirkt diese Fokussierung eine Eingrenzung der aggressiven Abwehrmechanismen. So werden nicht nur die Bakterien eingeschlossen, sondern auch der Gewebeschaden wird möglichst gering gehalten. Die Bakterieneindämmung findet primär in den aktivierten Makrophagen des Granuloms statt. Die Abgrenzung wird häufig dadurch verstärkt, daß Granulome von einem Fibrinwall umgeben werden. An der Bakterienabtötung sind ins-

besondere reaktive Sauerstoffintermediate (ROI) und reaktive Stickstoffintermediate (RNI) beteiligt [31]. Während die Bedeutung der RNI für die antibakterielle Abwehr im Mäusesystem bewiesen ist, ist dies für das Humansystem nicht völlig geklärt. Dennoch häufen sich die Befunde, daß Humanmakrophagen bei bakteriellen Infektionen die hohen RNI-Mengen produzieren können, die für die Kontrolle der intrazellulären Bakterien benötigt werden.

Während viele intrazelluläre Bakterien in einem optimal aktivierten Granulom vollständig ausgerottet werden können, gelingt dies mit dem Tuberkuloseerreger meist nicht. Im Granulom kann das Wachstum der Erreger aber so weit unterbunden werden, daß es bei Immunkompetenz nicht zum Krankheitsausbruch kommt. Es stellt sich ein labiles Gleichgewicht zwischen Erregerpersistenz und Immunabwehr ein, welches verhindert, daß die Infektion zur Tuberkulose führt. Da einige Tuberkuloseerreger aber persistieren, können geringfügige Schwächungen des Immunsystems nach vielen Jahren eine Reaktivierung einleiten, die sich dann als klinisch apparente Tuberkulose manifestiert.

Entwicklung neuer Impfstoffe gegen Tuberkulose

Die Tuberkulose ist keine Krankheit der Neuzeit. Sie war bereits im Mittelalter weitverbreitet, obwohl sich die Infektion damals häufiger als Skrofulose denn als Schwindsucht darstellte. Entsprechend alt ist der Wunsch der Menschheit, gegen diese Geißel vorzugehen [32]. Auch Robert Koch setzte viele Energien daran, ein Heilmittel gegen die Tuberkulose zu entwickeln. Im Prinzip wollte er einen therapeutischen Impfstoff herstellen, der durch spezifische Stärkung des Immunsystems mit Hilfe von Mykobakterienprodukten die Erregerausrottung bewirkt. Diese Tuberkulinversuche, über die Robert Koch erstmalig 1890, auf dem 10. Internationalen Medizinischen Kongreß in Berlin, berichtete, schlugen jedoch weitgehend fehl (Abb. 5) [33]. Mit der Beschreibung der spezifischen Gewebsreaktion auf Mykobakterienprodukte lieferte Robert Koch aber die Erstbeschreibung einer verzögerten allergischen Reaktion. Das von ihm entwickelte Tuberkulin ist somit nicht die Basis für einen Tuberkuloseimpfstoff, aber die Grundlage des Tuberkulintests, der auch heute noch als Diagnostikum zur Früherkennung einer mykobakteriellen Infektion breite Anwendung findet. Den Kampf gegen die Tuberkulose führten die französischen Wissenschaftler Calmette und Guérin weiter, denen es im Jahr 1908 gelang, nach mehr als 230 Passagen über Galle-Glyzerinnährböden einen *M. bovis*-Stamm zu attenuieren [34]. Dieser Impfstamm – nach seinen Entdeckern BCG genannt – kam jedoch bald in Verruf. Im Jahr 1927 wurden 251 Kleinkinder in Lübeck gegen Tuberkulose geimpft. Durch eine Verwechslung wurden anstelle des BCG-Impfstamms Tuberkuloseerreger benutzt. Nach sechs Jahren war ein knappes



Aus dem Saale für die allgemeinen Sitzungen.

Abb. 5

Der große Saal des Zirkus Renz, in dem am 4. August 1890 die erste allgemeine Sitzung des 10. Internationalen Medizinischen Kongresses abgehalten wurde. R. Virchow hielt die Begrüßungsrede, J. Lister sprach über Antisepsis und R. Koch „Über bakteriologische Forschung“. Hier kündigte R. Koch erstmalig an, daß er Substanzen gefunden habe, „welche nicht allein im Reagenzglas, sondern auch im Tierkörper das Wachstum der Tuberkelbazillen aufzuhalten, imstande ist“.

Drittel der Kinder (77 Fälle) verstorben, und sechs Kinder litten noch immer an der Krankheit. Knapp die Hälfte der Kinder (129 Fälle) erkrankte an Tuberkulose, gesundete aber wieder. Lediglich bei 39 Kindern traten während des gesamten Zeitraums überhaupt keine Anzeichen einer klinischen Tuberkulose auf. Obwohl eine daraufhin eingesetzte Kommission beweisen konnte, daß nicht der BCG-Impfstamm, sondern ein virulenter *M. tuberculosis*-Erreger eingesetzt worden war, konnte das Mißtrauen gegen den BCG-Impfstoff nur langsam abgebaut werden [35]. Heute ist *M. bovis* BCG der weitestverbreitete Lebendimpfstoff mit den geringsten Nebenwirkungen. Wie oben bereits geschildert, ist BCG jedoch ein ungenügender Stimulator von CD8 T-Lymphozyten und bewirkt im Erwachsenenalter keinen ausreichenden Schutz. Erschwerend kommt hinzu, daß BCG möglicherweise entscheidende Genbereiche, die protektive Antigene kodieren, im Verlauf der Attenuierung verloren hat. Wahrscheinlich führten einige der Gendeletionen zum Virulenzverlust und schwächten dabei gleichzeitig die Immunogenität des BCG-Impfstoffs ab.

Derzeit werden weltweit beträchtliche Anstrengungen unternommen, einen verbesserten Tuberkuloseimpfstoff zu entwickeln [3]. Die unterschiedlichen Impfstoffkandidaten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Im wesentlichen können drei Strategien

Impfstoffkandidat	Bemerkung	
	Möglicher Vorteil	Möglicher Nachteil
Zytolysin-exprimierende r-BCG	Aktivierung von CD4 und CD8 T-Zellen	Fehlen Tuberkulose-spezifischer Antigene, Virulenz (?)
Tuberkulose-spezifische Antigen-exprimierende r-BCG	Protektive Antigene	Ungenügende CD8 T-Zellstimulation, Virulenz (?)
Tuberkulose-spezifische Antigen-exprimierende r-Impfstoffe	Aktivierung von CD4 und CD8 T-Zellen, protektive Antigene	Enges Antigenpektrum, Virulenz (?)
Sezerniertes Antigen in geeignetem Adjuvanz	Auswahl protektiver Antigene, geringe Nebenwirkungen	Ungenügende CD8 T-Zellstimulation, enges Antigenpektrum
Nackte DNA	Auswahl protektiver Antigene	Ungenügende CD4-T-Zellstimulation, enges Antigenpektrum, Persistenz (?)
Deletionsmutanten von <i>M. tuberculosis</i>	Aktivierung von CD4 und CD8 T-Zellen	Virulenz (?)

Tabelle 2
Impfstoffkandidaten gegen Tuberkulose

unterschieden werden, die zum Teil auch kombinierbar sind. Die erste Strategie beruht auf der Annahme, daß BCG erhebliche Vorteile besitzt und daher durch geeignete genetische Manipulationen verbessert werden sollte. Entsprechend sollte ein verbesserter BCG-Impfstoff ein breiteres Spektrum an T-Zellpopulationen stimulieren und *M. tuberculosis*-spezifische Antigene exprimieren. Die zweite Strategie beruht auf der Annahme, daß ein oder wenige protektive Antigene für den Impfschutz ausreichen. Diese Antigene können entweder von lebenden r-Bakterienträgern exprimiert werden oder in geeigneter Adjuvanzformulierung dargeboten werden. Alternativ ist auch die Impfung mit nackter DNA, welche die kodierenden Gene enthält, denkbar. Die dritte Strategie schließlich versucht, durch gezielte Deletion von Virulenzfaktoren *M. tuberculosis* zu attenuieren, ohne daß die protektiven Antigene verlorengehen. Aus obigen Ausführungen ist klar, daß sämtliche Strategien ihre Vor- und Nachteile haben und daß der bestmögliche Impfstoff letztendlich nur durch Vergleichsexperimente gefunden werden kann.

Schlußbemerkungen

Mikrobielle Infektionen haben die Menschheit von Anfang an begleitet, und häufig haben Seuchen unsere Geschichte stärker beeinflußt als Kriege. Dennoch gelang bislang keinem Krankheitserreger der vollständige Sieg über die Menschheit. Einige wenige Krankheitserreger verschwanden zwar im Laufe der Menschheitsgeschichte (am besten ist die Ausrottung der Pocken in Erinnerung, die von der Weltgesundheitsbehörde am 8. Mai 1980 verkündet wurde). Die heute bekannten Erreger aber konnten trotz enormer Anstrengungen nicht vernichtet werden. So hat sich ein balanciertes Wechselspiel zwischen Erreger und Wirtsabwehrkräften ausgebildet, das außerordentlich dynamisch ist und sich fortwährend weiterentwickelt. Es verwundert daher nicht, daß sich das Immunsystem, dem bei Säugern die Hauptaufgabe der Erregerbekämpfung zukommt, laufend weiterentwickelt, um den unterschiedlichen Strategien der Krankheitserreger gerecht zu werden. Mikroben haben die verschiedensten ökologischen Nischen dieser Erde erobert, und der menschliche Körper stellt nur einen von unzählig vielen Lebensräumen dar. Die Eroberung dieser Nischen gelang den Mikroben durch die „Strategie der Vielfalt“ [32]. Aufgrund ihrer Variationsfähigkeit entwickelten Mikroben kontinuierlich neue Eigenschaften, die ihnen die Besiedlung neuer Lebensräume ermöglichten. Die Überlebensstrategie höherer Organismen beruht dagegen auf der Entwicklung höherer Komplexität. Infektionskrankheiten können daher als Kampf zweier unterschiedlicher Überlebensstrategien verstanden werden, und die Frage, welche der beiden Strategien auf lange Sicht erfolgreicher ist, kann schwer beantwortet werden. Aufgrund der hohen Komplexität des Menschen stehen uns aber auch nicht-

immunologische Fähigkeiten zur Verfügung. Unsere Möglichkeiten zur Bekämpfung zahlreicher Infektionskrankheiten wurden durch Chemotherapeutika und Impfstoffe verbessert, die mit Hilfe unserer Intelligenz entwickelt wurden. Dennoch steht das Immunsystem zahlreichen anderen Erregern noch immer ohne Unterstützung gegenüber. Die tiefere Einsicht in unser Immunsystem, verbunden mit den neuen Erkenntnissen aus Molekulargenetik und Zellbiologie, ermöglicht die gezielte Entwicklung einer neuen Impfstoffgeneration zur Unterstützung unseres Immunsystems. Dies kann dazu beitragen, die Sorge von Louis Pasteur abzuwenden, daß es die Mikroben sind, die das letzte Wort haben werden („ce sont les microbes qui auront le dernier mot!“).

Danksagung

Die wissenschaftlichen Arbeiten des Autors werden finanziell durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (SFB 322 und Ka 573/3-2), das BMBF-Verbundprojekt „Mykobakterielle Infektionen“, das Interdisziplinäre Zentrum für Klinische Forschung an der Universität Ulm und das Deutsche Aussätzigenhilfswerk unterstützt. Ich danke Frau C. Möller und R. Mahmoudi für ihre wertvolle Hilfe.

Literatur

- 1 Koch, R.: Die Ätiologie der Tuberkulose. In: Berliner Klin. Wochenschr., 19 (1882), S. 221-230.
- 2 Kaufmann, S. H. E. & J. D. A. Van Embden: Tuberculosis: a neglected disease strikes back. In: Trends in Microbiol., 1 (1993), S. 2-5.
- 3 Kaufmann, S. H. E.: Antibacterial vaccines: Impact of antigen handling and immune response. In: J. Mol. Med., 75 (1997), S. 360-363.
- 4 Kaufmann, S. H. E. (Hg.): Host Response to Intracellular Pathogens. Austin: R. G. Landes Co., 1997.
- 5 Finlay, B. B. & P. Cossart: Exploitation of mammalian host cell functions by bacterial pathogens. In: Science, 276 (1997), S. 718-725.
- 6 Kaufmann, S. H. E.: Immunity to intracellular bacteria. In: Paul, W. E. (Hg.), Fundamental Immunology, 4. Auflage, Philadelphia: Lippincott-Raven, im Druck.
- 7 Kaufmann, S. H. E.: The roles of conventional and unconventional T cells in antibacterial immunity. In: ASM News, 63 (1997), S. 251-255.
- 8 Hess, J., Ladel, C., Miko, D. & S. H. E. Kaufmann: *Salmonella typhimurium* aroA⁻ infection in gene-targeted immunodeficient mice. Major role of CD4⁺ TCR-ab cells and IFN- γ in bacterial clearance independent of intracellular location. In: J. Immunol., 156 (1996), S. 3321-3326.

- 9 Ladel, C. H., Daugelat, S. & S. H. E. Kaufmann: Immune response to *Mycobacterium bovis* bacille Calmette Guerin infection in major histocompatibility complex class I- and II- deficient knock-out mice: contribution of CD4 and CD8 T cells to acquired resistance. In: Eur. J. Immunol., 25 (1995), S. 377-384.
- 10 Ladel, C. H., Flesch, I. E. A., Arnoldi, J. & S. H. E. Kaufmann: Studies with MHC deficient knock-out mice reveal impact of both MHC I and MHC II dependent T cell responses in *Listeria monocytogenes* infection. In: J. Immunol., 153 (1994), S. 3116-3122.
- 11 Flynn, J. L., Goldstein, M. M., Triebold, K. J., Koller, B. & B. R. Bloom: Major histocompatibility complex class I-restricted T cells are required for resistance to *Mycobacterium tuberculosis* infection. In: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 89 (1992), S. 12013-12017.
- 12 Kaufmann, S. H. E.: Immunity to intracellular bacteria and protozoa. In: The Immunologist, 3 (1995), S. 221-225.
- 13 Hess, J., Gentschev, I., Miko, D., Welzel, M., Ladel, C., Goebel, W. & S. H. E. Kaufmann: Superior efficacy of secreted over somatic antigen display in recombinant Salmonella vaccine induced protection against listeriosis. In: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 93 (1996), S. 1458-1463.
- 14 Gentschev, I., Sokolovic, Z., Mollenkopf, H.-J., Hess, J., Kaufmann, S. H. E., Krohne, G. F., Goebel, W. & M. Kuhn: *Salmonella* secreting active listeriolysin changes its intracellular localization. In: Infect. Immun., 63 (1995), S. 4202.
- 15 Kaufmann, S. H. E., Rodewald, H. R., Hug, E. & G. De Libero: Cloned *Listeria monocytogenes* specific non-MHC-restricted Lyt2⁺ T cells with cytolytic and protective activity. In: J. Immunol., 140 (1988), S. 3173-3179.
- 16 Lenz, L. L. & M. J. Bevan: H2-M3 restricted presentation of *Listeria monocytogenes* antigens. In: Immunol. Rev., 151 (1996), S. 107-121.
- 17 Szalay, G., Ladel, C. H. & S. H. E. Kaufmann: Stimulation of protective CD8⁺ T lymphocytes by vaccination with nonliving bacteria. In: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 92 (1995), S. 12389-12392.
- 18 Porcelli, S. A.: The CD1 family: A third lineage of antigen-presenting molecules. In: Adv. Immunol., 59 (1995), S. 1-98.
- 19 Beckman, E. M., Porcelli, S. A., Morita, C. T., Behar, S. M., Furlong, S. T. & M. B. Brenner: Recognition of a lipid antigen by CD1-restricted ab⁺ T cells. In: Nature, 372 (1994), S. 691-694.
- 20 Sieling, P. A., Chatterjee, D., Porcelli, S. A., Prigozy, T. I., Mazzaccaro, R. J., Soriano, T., Bloom, B. R., Brenner, M. B., Kronenberg, M., Brennan, P. J. & R. L. Modlin: CD1-restricted T cell recognition of microbial lipoglycan antigens. In: Science, 269 (1995), S. 227-230.
- 21 Kaufmann, S. H. E.: $\gamma\delta$ and other unconventional T lymphocytes: What do they see and what do they do? In: Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 93 (1996), S. 2272-2279.
- 22 Ladel, C. H., Blum, C., Dreher, A., Reifenberg, K. & S. H. E. Kaufmann: Protective role of $\gamma\delta$ T cells and α/β T cells in tuberculosis. In: Eur. J. Immunol., 25 (1995), S. 2877-2881.

- 23 Mombaerts, P., Arnoldi, J., Russ, F., Tonegawa, S. & S. H. E. Kaufmann: Different roles of α/β and $\gamma\delta$ T cells in immunity against an intracellular bacterial pathogen. In: *Nature*, 365 (1993), S. 53-56.
- 24 Tanaka, Y., Morita, C. T., Nieves, E., Brenner, M. B. & B. R. Bloom: Natural and synthetic non-peptide antigens recognized by human $\gamma\delta$ T cells. In: *Nature*, 375 (1995), S. 155-158.
- 25 Kaufmann, S. H. E., Emoto, M., Szalay, G., Barsig, J. & I. E. A. Flesch: Interleukin 4 and listeriosis. In: *Immunol. Rev.*, 158 (1997), S. 95-105.
- 26 Fearon, D. T. & R. M. Locksley: The instructive role of innate immunity in the acquired immune response. In: *Science*, 272 (1996), S. 50-54.
- 27 Abbas, A. K., Murphy, K. M. & A. Sher: Functional diversity of helper T lymphocytes. In: *Nature*, 383 (1996), S. 787-793.
- 28 Trinchieri, G.: Interleukin-12: A proinflammatory cytokine with immunoregulatory functions that bridge innate resistance and antigen-specific adaptive immunity. In: *Annu. Rev. Immunol.*, 13 (1995), S. 251-276.
- 29 Murray, H. W.: Interferon-gamma and host antimicrobial defense: current and future clinical applications. In: *Am. J. Med.*, 97 (1994), S. 459-467.
- 30 Dannenberg, A. M., Jr.: Delayed-type hypersensitivity and cell-mediated immunity in the pathogenesis of tuberculosis. In: *Immunol. Today*, 12 (1991), S. 228-233.
- 31 MacMicking, J., Xie, Q. & C. Nathan: Nitric oxide and macrophage function. In: *Annu. Rev. Immunol.*, 15 (1997), S. 323-350.
- 32 Kaufmann, S. H. E.: Die Familie der Mycobacteriaceae. In: Brandis, H., Köhler, W., Eggers, H. J. & G. Pulverer (Hg.), *Lehrbuch der Medizinischen Mikrobiologie*, Stuttgart/New York: Gustav Fischer Verlag, 1994, S. 544-562.
- 33 Koch, R.: Ueber bakteriologische Forschung. In: *Verhandlungen des X. Internationalen Medicinischen Congresses*, 1 (1891), S. 35-47.
- 34 Calmette, A.: *La Vaccination Préventive contra la Tuberculosis*, Paris: Masson et Cie., 1927.
- 35 Anonymus: *Die Säuglingstuberkulose in Lübeck*, Berlin: Julius Springer, 1935.
- 36 Gould, S. J.: *Full House: The Spread of Excellence from Plato to Darwin*. Harmony Books, 1996.

Akademievorlesungen

*Einführung zur Akademievorlesung
von Hans-Joachim Queisser am 30. Mai 1996*

Dieter Simon

Präsident der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften

Meine Damen und Herren,

aus Anlaß des Vortrages unseres Mitgliedes Hans-Joachim Queisser begrüße ich Sie sehr herzlich in den immer noch unrenovierten Räumen der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften.

Sie haben sich trotz nicht zu verachtender Konkurrenz für uns, d. h. für Herrn Queisser, entschieden, obwohl im Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, im Wissenschaftskolleg, in der Humboldt-Universität und im Einstein Forum in Potsdam heute abend Veranstaltungen stattfinden, die ebenfalls geeignet sind, jene anzuziehen, die mit wachen Augen die Zeitläufte verfolgen. Daß sie sich entschlossen haben, einem Manne zuzuhören, der eben dies, nämlich die wache Beobachtung seiner Umwelt, zeitlebens praktiziert hat, da er andernfalls nicht zu dem weltbekannten Physiker hätte werden können, zu dem er wurde, und der obendrein einfühlsames Verständnis für die Beobachtungen anderer – also für Wissenschaftsgeschichte – bewiesen hat, ohne das die selbstkritische Bewertung des eigenen Tuns unmöglich wäre, und der überdies seinen Kollegen immer als temperamentvoller, witziger und unkonventioneller Vertreter seiner Disziplin erschienen ist, verrät entweder vorgängige Kenntnis des Vortragenden oder einen sicheren Instinkt für spannende Wissenschaft. In jedem Fall werden Sie auf Ihre Kosten kommen.

Hans-Joachim Queisser ist der Gründungsdirektor des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung in Stuttgart und lehrt als Professor an der dortigen Universität.

Wie die Redner unserer beiden vorausgegangenen Akademievorlesungen ist er Berliner, d. h. er ist in Berlin geboren, zur Schule gegangen, hat hier das Abitur gemacht und hat (wenn auch nur einige Semester) in Berlin studiert – eine Häufung, die Sie je nach Ihrer Haltung zu Berlin erfreut oder gelassen zur Kenntnis

nehmen sollten, aus der Sie aber vorläufig noch keine *conditio sine qua non* ableiten dürfen.

Für einen modernen Physiker, der gleichzeitig der berühmten Traditionen seines Faches eingedenk sein will, war es unabdingbar, daß Queisser seine Studien zunächst in Amerika (in Lawrence, an der University of Kansas) und dann in Göttingen fortsetzte, wo er sie auch 1958 mit der Promotion abschloß.

Schon damals ging es, wie der Titel *Zur Struktur dünner, bei tiefer Temperatur kondensierter Salzsichten* verrät, um das, was ihn zeitlebens beschäftigte: die Kristalle. (Als typischer Zwei-Kulturen-Geschädigter kann ich nur hoffen, daß das nicht ganz falsch ist, denn da das Wort Kristall [vermutlich nicht zufällig] im Titel gerade nicht vorkommt, bin ich auf meine Assoziationen, die sich beim Ausdruck „Salz“ einstellen, angewiesen – und das sind eben die Kristalle.)

Bis hierhin ging also alles, wenn man so will, ganz normal. Dann allerdings geschah etwas, das zeigte, daß Queisser nicht bereit war, die Normalität zu seinem Lebensprogramm zu erheben. Er tat einen Schritt, den er in seinem Buch *Kristallene Krisen* so beschreibt:

„Die meisten Kollegen und Bekannten hatten mich für nahezu verrückt erklärt, wie man als wissenschaftlicher Assistent an einer Universität und dazu mit dem Status eines deutschen Beamten auf Widerruf alles aufgeben könne und nach Kalifornien aufbricht, nicht nur als Gast mit Rückkehrversicherung, sondern als registrierter Einwanderer! Es war ja sogar noch viel schlimmer, ich verließ Deutschland nicht, um an eine anständige Universität zu gehen, schließlich gab es die ja in Berkeley oder Stanford, nein, es mußte eine Stellung in einer Industriefirma sein. Eine ganz kleine Firma war es zudem noch, die Pensionsberechtigung war unsicher.“

Die kleine Firma von der hier die Rede ist, war die Shockley Transistor Corporation im kalifornischen Mountain View, bei der Queisser dann in den Jahren 1959–1963 als *Senior Scientist* arbeitete. Bill Shockley, einer der drei Physik-Nobelpreisträger des Jahres 1956, war einer jener berühmten, vorwiegend in Scheunen und Garagen operierenden kalifornischen Firmengründer, die aus der Geschichte der mikroelektronischen Revolution nicht hinwegzudenken sind. Der Nobelpreis wurde 1956 für die Erfindung des Transistors und die wegweisenden Untersuchungen auf dem Gebiet der Halbleitertechnik vergeben.

Die fünf Jahre unter der kalifornischen Sonne, in einem mit der Heimat weder vom persönlichen oder kulturellen Ambiente noch von den Entfaltungschancen her vergleichbaren Raum, dürften den bei Arbeitsaufnahme noch nicht 30jährigen Physiker tief geprägt haben.

Jedenfalls wirkt die 1964 in Frankfurt am Main absolvierte Habilitation wie eine kleine Zwischenmusik, rasch gespielt, um wieder nach Amerika zu verschwinden – diesmal als *Member of Technical Staff* bei den Bell Telephone Laboratories in

Murray Hill (New Jersey). Das Thema der Habilitation lautete (diesmal gibt es über den Gegenstand keinen Zweifel): *Kristalldefekte in Silizium*.

Also noch einmal, bevor sich die Habilitation auswirken kann: die amerikanische Wirtschaft. Diesmal bei „Ma Bell“, die, wie Queisser sie nennt, „mütterliche Ernährerin aller jungen Technologiefirmen“. Und dann erst schwenkt der inzwischen 35jährige in die heimatliche, die deutsche Professoren-Realität zurück, für deren Ambitionen und Kümmernisse er allerdings niemals mehr den rechten Ernst aufzubringen wußte: Er wird – inzwischen schreiben wir das Jahr 1966 – ordentlicher Professor für Experimentalphysik an der Universität Frankfurt am Main.

Aus deren Diensten scheidet er allerdings schon recht bald wieder aus, da er 1970 einer Bitte der Max-Planck-Gesellschaft folgt und die Aufgabe übernimmt, das Max-Planck-Institut für Festkörperphysik in Stuttgart zu gründen. Die Erledigung dieses Auftrags war zugleich der gelungene Start in eine eindrucksvolle und folgenreiche wissenschaftspolitische Karriere.

1970 wird er Mitglied der persönlichen Beratungsgremien der Bundesminister für Forschung und Technologie und bleibt dies bis 1983. 1975–1977 ist er Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. 1975–1983 wirkt er als Mitglied des Senates der Max-Planck-Gesellschaft. 1982–1985 führt er den Vorsitz des Wissenschaftlichen Rates der Max-Planck-Gesellschaft. 1977–1986 arbeitet er als Mitglied des Kuratoriums der Stiftung Volkswagenwerk. 1985 richtet er die sogenannte „Queisser-Kommission“ des BMFT ein und führt deren Vorsitz. Aufgabe dieser Kommission war die Ausarbeitung eines Berichts zum Thema *Informationstechnik. Förderung der institutionellen Forschung und Entwicklung*. Der Bericht unterbreitete Vorschläge zur Verstärkung der Grundlagenforschung auf den Gebieten der Informations- und Kommunikationstechnik sowie der Basistechnologie Mikroelektronik. Schließlich (die Anmaßung in dieser Reihung sollten sie dem Präsidenten nachsehen) ist Hans-Joachim Queisser seit 1994 ordentliches Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften.

Weniger als eine Frucht der Wissenschaftspolitik denn als eine der Wissenschaft ist es anzusehen, daß Herr Queisser das Mitglied zahlreicher (vor allem auch amerikanischer) wissenschaftlicher Gesellschaften und gelehrter Gremien geworden ist. Er gehört vielen Räten und Beiräten an – der weitaus wichtigste scheint mir, nach meiner freilich nicht sehr elaborierten Kenntnis auf diesem Gebiet, der Deutsch-Japanische Kooperationsrat zu sein, der den vom japanischen Premierminister und dem Bundeskanzler angeregten deutsch-japanischen Dialog moderiert.

Daß man auf einem solchen Lebensweg zum Träger vieler Auszeichnungen avanciert, hat nichts Verwunderliches, verdient aber gleichwohl hervorgehoben zu werden. Eine seiner schönsten Auszeichnungen ist nach meiner Auffassung die Medaille für naturwissenschaftliche Publizistik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, mit der er 1985 ausgezeichnet wurde. Er hat sie für das vorhin bereits

erwähnte Buch *Kristallene Krisen* erhalten, welches mittlerweile schon in zweiter Auflage vorliegt. Mit diesem Buch, das faszinierend geschrieben und voller Esprit ist, wurde Hans Queisser bei einem breiteren, nicht-naturwissenschaftlich ausgebildeten Publikum bekannt.

Queisser zeichnet den Weg der Erforschung der Kristallstrukturen bis hin zu ihrer schließlich erfolgreichen Nutzung im Bereich der Mikroelektronik nach – ein schwieriger Weg, den er mit der Metapher der „kristallinen Krisen“ umschreibt. Er erläutert jedoch nicht nur den revolutionären Vorgang der Entstehung und Entwicklung einer neuen Disziplin – der Mikroelektronik –, die Wissenschaft und Kultur in einer nur mit der Erfindung des Buchdrucks vergleichbaren Weise veränderte und noch verändert, sondern er deutet diese Vorgänge als einen umfassenden historischen Prozeß, an dessen (noch nicht absehbarem) Ende eine neue Epoche stehen wird. Am Ende dieser Analyse, bei der der Physiker Queisser nicht nur zum vom Zwei-Kulturen-Syndrom freien Geisteswissenschaftler, sondern nach ältester Tradition vom Physiker zum Philosophen geworden ist, steht die europäische Prophezeiung, deren Erfüllung wir inzwischen wieder ein großes Stück nähergerückt sind:

„Europa hat seine industrielle Vorherrschaft wesentlich auf die Beherrschung der Metalle aufgebaut. Eisen und Stahl werden auch weiterhin wichtig bleiben [...]. Das Ende der Eisenzeit aber deutet sich unmißverständlich an. [...] Wir stehen vor dem Anbruch einer neuen Zeit, auch sie wird nach aller Voraussicht wieder den Namen eines festen Stoffes erhalten, dessen Beherrschung völlig Neues entstehen läßt. Wahrscheinlich wird das Zeitalter nach dem Kristall benannt werden, der schon heute mit seinen besonderen Eigenschaften die Szene beherrscht: Diese neue Epoche wird vielleicht Siliziumzeit heißen.“

Hans-Joachim Queisser

Research in Silicon Valley Forschung im Silicon Valley

(Akademievorlesung am 30. Mai 1996)

Die Gegend südlich von San Francisco in Kalifornien wird heute das "Silicon Valley" genannt, weil dort die entscheidende Entwicklung der Mikroelektronik mit dem halbleitenden Material Silizium stattfand. Das Silizium löste erst spät das viel leichter handhabbare Germanium ab, mit dem im Jahre 1947 bei den Bell Laboratories die erste Demonstration des Transistors erfolgt war. Die folgende Publikation berichtet über persönliche Erfahrungen in der Forschung dieser frühen Zeit der Siliziumtechnik im Laboratorium von William Shockley. Sie ist eine erweiterte, englischsprachige Fassung des Akademievortrages am 30. Mai 1996 in Berlin.

Introduction

The transistor invention in the *warm Christmas Eve atmosphere* (1) of 1947 has shaped our daily lives in a truly profound manner. A huge industry with a wide gamut of applications has developed from this first demonstration of transistor action in a semiconducting material (2–6). In retrospect, this glorious success story appears like an inevitable, almost logical chain of events. Such a view is, however, far from being a correct historical interpretation. Many decades of often frustrating attempts to understand semiconducting materials preceded the transistor demonstration. Decades of struggle followed before the transistor gained acceptance in industrial applications. Vexing detours had to be traveled before the seemingly so simple and obvious idea of a field-effect transistor was finally put into practice.

This paper opens with a description of the background information, on which the transistor development was based. Next, the early research work is covered, especially the competition between germanium and the eventually victorious silicon.

The main part then reports upon the materials research work in the early years of this most famous industrial region, carrying the name of a semiconducting element: silicon.

Pristine Semiconductor Foundations

Grapplings of a Century Ago

Our scientific forefathers of the nineteenth century performed remarkable amounts of empirical work, documenting the physical properties of all sorts of materials. Metals were quite easy; the bronze age and the iron age were based on this wisdom. Ohm's law was established and seemed – eventually – convincing and useful for the oncoming age of electricity. Yet there were strange classes of naturally occurring minerals, many sulfides and oxides in particular, which disobeyed the simple rules; they were neither good metals nor could they be classified as insulators. The parameters for these materials were almost impossible to be obtained uniquely and reproducibly for handbook listings. External influences and deviations from chemical purity were apparently of significance. Such irreproducibility disqualified these materials from proper scientific attention. Out of sheer desperation, the disparaging term *semiconductor* was adopted.

Ferdinand Braun, a young high school teacher at Leipzig, Germany (4, 7) provided the first definitive report in 1874 on the rectifying properties of a metallic point contact on crystalline sulfides (8). A nonlinear and polarity-dependent current flow was demonstrated in an experimental lecture in the November of 1876 (4, 7), a truly revolutionary violation to the contemporary paradigm of Ohmic linearity! Suspicions arose, especially against the artificiality of the low-dimensional contact. The physics community dared not to tread on such dangerous grounds. A comparatively much better defined area of investigations arrived with the evacuated tubes, where individual electrons could be isolated and studied. Braun himself deserted solids for the tube; he invented the cathode-ray tube (*Braunsche Röhre*) in 1897. The Nobel Prize in physics of 1909, however, acknowledged his solid-state contributions. Guglielmo Marconi, who shared the prize, and Braun had laid the foundations for simple and cheap radio receivers of that age. Although it was yet totally unclear how these needle-detectors worked, they were still useful to rectify and demodulate radio waves, although in a noisy and instable fashion (7). The systematic search by last century's chemists for completing the periodic table encountered substantial difficulties with the elements in the center of the table. The slot below silicon in the fourth column remained mysteriously empty until Clemens Winkler, a chemist in the "Bergbauakademie" in Freiberg, Sachsen, Ger-

many identified a new element (4, 9) in 1886, which he baptized *germanium*, patriot that he had to be in the nationalistic European era of his days. By the end of last century, synthesis of elemental silicon and germanium was well documented, and it seemed irrefutable to at least a minority of scientists that these elements plus selenium and an extensive number of compounds, especially copper oxide or cadmium sulfide, were neither metals nor insulators. These materials were all quite remarkable photoconductors. Embarrassing was the analysis by the Hall effect: several samples indicated transport by some sort of positive charge carrier, certainly *not* an ion.

Primitive Device Suggestions

Those accepting that semiconductors were indeed a separate class of materials, were almost forced to consider applications. These materials had charge carrier volume densities much below those of real metals. It became clear – especially via photoconductance – that external influences could modulate the carrier densities, apparently by incredibly large variations over many decades; unthinkable for metals! This wide variation of the resistance of a strip of semiconductor should be controllable to act as a switch for current flow. The simplest arrangement would be a parallel-plate condenser. One plate would be the semiconductor, whose conductivity ought to be "influenced" (in the electrostatic sense) by the voltage of the other plate, made of a metal. We now know that this idea forms the basis for a field-effect-transistor (10). The many attempts of those days a century ago, mostly undocumented, all failed. Materials control remained inadequate (10, 11).

Device usage of semiconductors was therefore restricted to primitive applications. Large-area rectifiers made of selenium or copper oxide conquered good market shares because they were cheap. Engineers suspected that the rectification originated from the interface between a contact metal and the semiconductor. It seemed necessary to "form" these interfaces somehow by an annealing treatment, often with a voltage applied. These techniques were so completely heuristic and non-scientific that people spoke of the "*shame of the rectification – problem*" (12). Nevertheless, semiconductors existed in symbiosis with the regally reigning electron vacuum tubes, but merely in a lowly, humble slavery of ancillary passive functions.

The other usage was photoconductivity, remarkably optimized by empirical efforts and utilized in applications of measurements and control, such as in exposure meters for cameras or in light-activated sensors and switches. Studies of photoconductance by Russell Ohl (13) evidenced two types of silicon with *positive* and *negative* carriers, leading to early distinction between *p*- and *n*-type materials and

first inklings about junctions. Semiconductor applications were hence restricted to just two-terminal functions. A realization of a three-terminal device with amplification, oscillation, and modulation was still impossible; one relied on tubes, however complicated, expensive, far from thermal equilibrium these evacuated devices were (4, 14).

The Basis of Quantum Theory

Quantum theory, first succeeding with atoms and molecules, expanded to the solid state with the simplifying notion of periodic atomic arrangements in a crystal. The glaring difference between a many-electron metal and a few-electron semiconductor was suddenly clarified: semiconductors had an energy gap between the low-lying valence electrons and the higher states of conduction electrons. The idea of localized electronic states inside the forbidden gap explained many features, including selective photoexcitation of conductance. Theorists such as Felix Bloch, Max Born, Léon Brillouin, or Rudolf Peierls all helped to elevate solids, especially semiconductors, to presentable, tractable objects of quantum physics (4–6, 14). It was no longer demeaning to devote oneself to semiconducting materials, an important fact to attract good young researchers! In 1912, quantitative X-ray analysis became available by Laue's discovery (4), and the crystal was finally an accepted, even respectable target of physics. The ideal solid as a perfect, infinitely extended regular spatial array with unperturbed translational symmetry, free of impurities was, however, just an elegant concept, useful for group theory. The real solids were very far removed from this lofty ideal.

Single crystals, as idealized in theory, had to become available for practice. Early work was performed with alkali halides, which are easy to be pulled as single crystals out of a melt. Spiro Kyropoulos in the attic of Robert Pohl's labs at Göttingen University (4, 15) succeeded to grow large and quite perfect crystals to serve as model solids in color center research (16); Johan Czochralski did similar work on metals (17); his name is perpetuated in today's growth technology for semiconductors. Silicon and germanium, however, were too difficult to be grown in the twenties and thirties, there also seemed no need to attempt it as yet.

A small theorists' community began to tackle first the metal-semiconductor interface; an appropriate topic, as we can judge today. Nevill Mott (18) and Walter Schottky (13, 19) made the most significant contributions. A model was developed for the interface between a metal – with its Fermi level at the top of its electron energy distribution – and a semiconductor, with the Fermi level inside the gap and fixed by the doping. At equilibrium, those Fermi levels must coincide; an

applied voltage removes this constant behavior. The essential junction features of polarity-dependence and nonlinearity were therefore at least plausible.

Quantum theory also prescribed the treatment of the electrons, especially the dependence of their energies E as functions of their wave vectors k . The Schroedinger equation had to be solved for the idealized periodic potential, yielding an energy dispersion $E(k)$, the "band structure". With it came the realization that electrons in a solid also have *antiparticles*, unoccupied states in the valence bands, the *holes*. The present generation is so used to this vital semiconductor feature that it is hard to explain how uneasy many people felt about this seemingly artificial concept. When Shockley wrote his book (20), his publisher did not accept the author's suggestion to mention "holes" first in the title – it was even difficult to keep them in the book's title at all!

Another, very significant realization occurred in those days: space charge layers appear in semiconducting materials. The small electron densities and the requirement of neutrality lead – via Poisson's equation – to regions of spatially fixed electric charge. A very helpful recipe was handed to the experimentalists: the geometric extension of such space charge layers is measurable via its capacitance (19)!

The thirties of our century thus provided basic tools and ideas to understand the novel phenomena of semiconductors, which truly sprang from quantum mechanics as applied to idealized crystal lattices. In retrospect, it may seem somewhat surprising that experimental realizations were so sluggish in keeping up with theory. The extreme difficulties in preparing, modifying, measuring these materials as definitive samples are the reasons for this delay. Materials reproducibility still presented an immense hurdle. Patents were filed, especially for the evident idea of a field-effect transistor (10), in particular by Julius Lilienfeld in 1926 (21), by Oscar Heil in 1935 (22), and by William Shockley in his patent notebook in 1939 (6, 23) – but any reduction to practice with their contemporary materials was totally unattainable – what frustration!

Wartime Semiconductor Detectors

Radar was a decisive weapon in the Second World War, especially in anti-aircraft strategy (4, 24). Huge efforts started in Britain and Germany, but on even bigger scales in the US MIT Radiation Laboratory. Detector diodes handling high radar frequencies were urgent for mixer applications. The only available solutions for this need were the elemental semiconductors Ge and Si, mounted in reasonably stable packages – with the *cat's whisker* of a metal spring contact to reduce capacitance for high-frequency operation. Frederick Seitz, active in this field, describes these events in a symposium (25). Figure 1 shows a typical rectifier diode arrange-

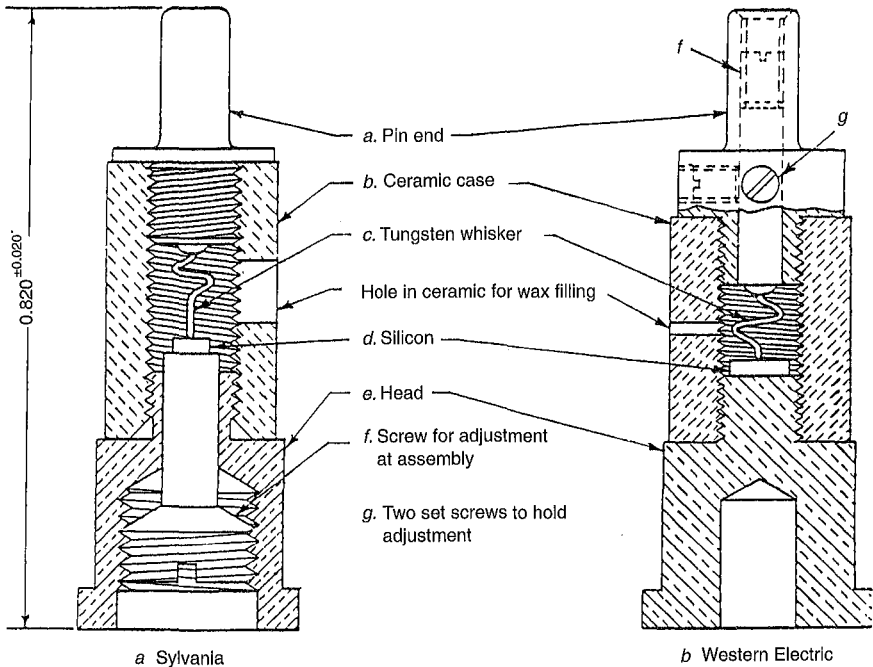


Figure 1
Radar detector diodes, USA of World War II, see Ref. (26)

ment; the illustration stems from a remarkable book on detectors of the "Radiation Lab Series" (26).

Empirical trial-and-error prevailed in the haste of this defense work. Recognition of admixing foreign elements, such as aluminum, to Ge and Si was considered more like traditional metallurgical alloying. Nevertheless, remarkable attention was paid to the theoretical foundations (25, 26). Hans Bethe (27) explained the low ionization energies of "donators" and acceptors, as compared to this energy of hydrogen, with the reduced masses of holes and electrons and with the screened attraction inside the dielectric medium, today taught as *effective-mass-theory*. Basic understanding thus also continued to expand during the war years.

Universities were also involved in scientific war service. Best known are the US activities at Penn State (28) and at Purdue, where Karl Lark-Horovitz and his doctoral students, in particular Ralph Bray, performed intensive studies on Ge – and were later surpassed by the massive research at Bell Labs (29). Even more tragic was the fate of Josef Stuke, who autopsied Ge diodes from British bombers,

shot down by German *flak* guns. He measured the intrinsic and extrinsic conductivities of Ge for his thesis; his advisor Robert W. Pohl did not accept his – correct – interpretations (6, 30) and therefore severely delayed publication. Most of the European, especially the German, academic establishment did simply not acknowledge the existence of semiconductors.

Orchestrated Efforts at Bell Labs

The Transistor Demonstrated

When the war ended, an extensive body of knowledge existed – both empirical and fundamental – on semiconductors, especially for germanium and silicon. Mervin Kelly, director at Bell Labs, rehired Shockley, who had been on duty for military "Operations Research" (31). Kelly and Shockley were convinced that a solid-state replacement for mechanical telephone switches was possible. The elemental semiconductors, prototypes for simple and defined materials, were selected as the

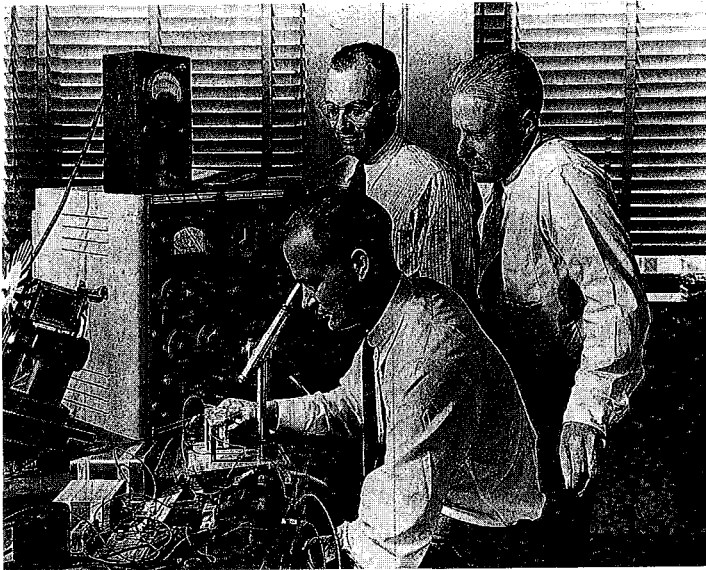


Figure 2

The transistor inventors of 1947 and Nobel laureates of 1956: William B. Shockley, looking through the microscope, John Bardeen (left), and Walter H. Brattain

objects of concentrated research. This mission was criticized by the applications engineers of the Bell System, who just demanded improvements and cost reductions for devices based on selenium and copper oxide, which were already heavily used in the network. The independence and the copious finances of Bell Labs, then being part of a regulated monopoly, provided the foundations for continuous, professional interdisciplinary research, delving deeply into the scientific base. The details of this work are profusely recorded in a historical book series of Bell Laboratories (32) and will not be repeated here. Shockley, group leader for the semiconductor effort, and his colleagues, especially John Bardeen and Walter Brattain, – shown in Figure 2 – related the story of the transistor invention on several occasions (33), such as in their Nobel speeches in 1956 (34). A highly personal account by Shockley is Ref. (35). December 23, 1947 has been officially decreed as the birthday of the *transistor*, because of the properly documented and verified reduction to practice on that day. The shaky germanium device is shown in Figure 3. On a piece of polycrystalline germanium, properly called *base*, two contact needles are seen, one injects minority carriers, the *emitter*, while the other needle collects them, obviously called the *collector*. Bell Labs colleague John Pierce suggested the name, where the prefix *trans* indicates the carrier transfer from one needle to the other.

Hardly Any Competitors

Bell Labs faced little competition in their semiconductor research. Universities could match neither the orchestrated teamwork by physicists, chemists, crystal growers, engineers nor the financial resources. Traditional US electrical companies, such as General Electric and Westinghouse, however, also got involved. Hopes to replace tubes in radios and in those fancy new computing machines or for improved telecommunication were not so much the driving forces for their research engagements. In the early fifties, it was more a straightforward continuation of their striving for better rectifiers for high-power applications. The wartime experiences, on silicon in particular, promised stable and temperature-tolerant large-area rectifier diodes to become achievable and to replace selenium and those unwieldy mercury-vapor rectifier vessels.

European efforts right after the war were scarce. Hardly anything happened in France; Britain and Holland started work only later. Strangely, it was war-devastated Germany, where many radar-experienced people remained and quickly returned to peaceful work (36, 37). Silicon was not put on the list of research forbidden in Germany by the US military government (OMGUS); Si was apparently not considered to be as significant as was, for example, magnesium – a strategic

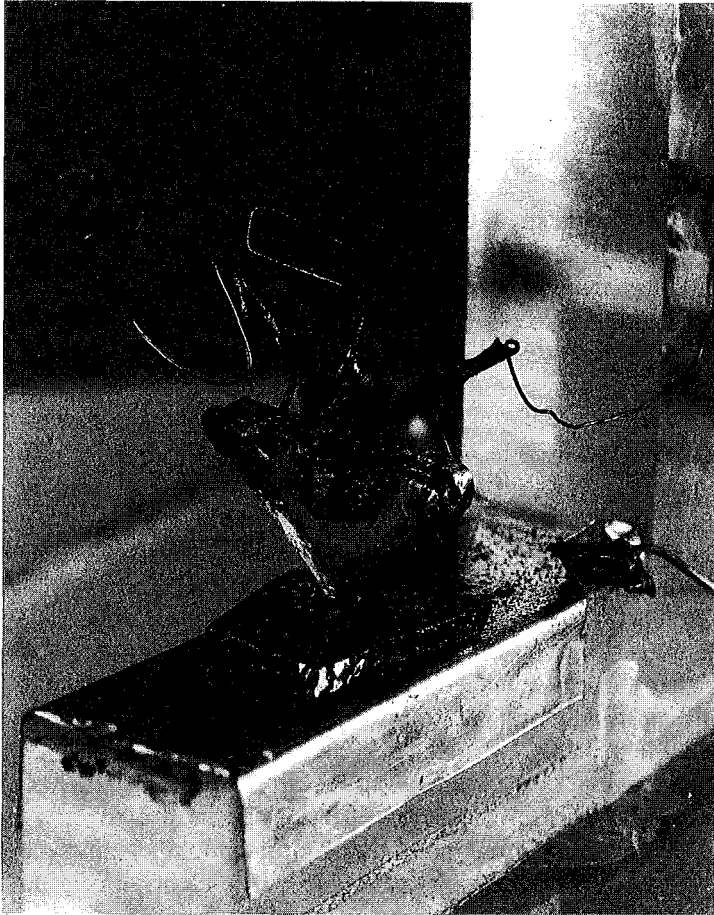


Figure 3

The early germanium point-contact transistor, demonstrated in the December of 1947 at Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey

aircraft metal. The wartime research on silicon and other semiconductors, however, was summarized in several of the so-called FIAT reports (36) for the Allies. The great advantages of the German electrical and chemical industries in synthesizing ultrapure silicon were effectively utilized, such as for basic patents of the *Siemens Process* (38). The Siemens-Schuckertwerke, being the high-power division of Siemens, had massive interests in getting better rectifiers for high currents and large voltages. The Siemens und Halske division, responsible for low-power

applications, such as telephony and radio, actually started a germanium device line in Berlin as early as 1945!

An old castle in Northern Bavaria, at Pretzfeld, served as home for silicon research by Eberhard Spenke and Walter Schottky (39), whose office was in a converted horse stable. The so-called *C-Prozeß* was finally victorious; here SiHCl_3 is dissociated near an inductively heated Si rod in a hydrogen atmosphere. This process became the world-wide standard and provided pretty license money for Siemens (38). Heinrich Welker, who had filed a field-effect device patent during the last week of the war, went to Siemens in Erlangen, where he later discovered the $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ - compound semiconductors, such as gallium arsenide (40). Serious Japanese semiconductor efforts, so charmingly related by Makoto Kikuchi (41), started in the fifties and then accelerated tremendously in the sixties.

Hardly a Device Breakthrough

Sad disappointments emerged after the glorious Christmas days of 1947. Bell's press conference for the transistor provoked no excitement, hardly any attention (4). Vacuum tubes continued unassailed. The wobbly dual-needled polycrystalline germanium transistor was essentially neglected. Neither industry nor the military dared to shift to these unreliable devices (2). New inventions do take longer times to succeed than usually anticipated by proud researchers. This sober realization also held for the transistor, although it initially seemed such an advantageous replacement for vacuum tubes (which reacted with sharply lowering prices).

Most people at Bell Labs, of course, were fully aware that the preset goal had *not* been achieved. The device of 1947 was certainly not the convincingly simple field-effect-transistor at all. The point-contacts were clumsy, makeshift arrangements. Shockley was particularly dissatisfied (35, 6) with the entire course of events, also deeply hurt in his typical, zealous pride, that his collaborators Bardeen and Brattain had achieved this outright deviatory invention and were the two authors for the scientific paper (42). In addition, the Bell System had to yield to a *patent consent decree* (2); the monopoly of the telephone network was kept with the consent that the transistor knowledge and the patent treasures be made widely available to all those interested in learning and using the new technology. This judgment proved to be most favorable for the development of modern microelectronics. The pride of the inventing team at Bell Labs, however, was certainly diminished.

What was actually demonstrated 50 years ago? Semiconductor materials were proven controllable and useful to amplify current! *Minority carrier injection* was experimentally verified, if only with those little aiguille contacts. Nonequilibrium

excess holes in electron-rich, n-type, germanium were proven to be achievable by external contacts. Bardeen had painstakingly elucidated that the adversity of the *surface* endangered transistor action. Most unexpected and truly promising was the observation that minority carriers had such astoundingly *long lifetimes*, before they recombined (43) at the surface or inside the defect-ridden material. The convincing beauty of the Haynes-Shockley experiment demonstrated this asset (44). Semiconductors now earned their important distinction to be materials, where non-equilibria could be achieved and maintained over substantial times and therefore also through substantial geometrical separations. Similar effects can never happen in metals, where the sea of the many electrons immediately reestablishes equilibria. The measurable minority carrier lifetime now ruled as the essential, merciless yardstick for crystal quality. This quantitative figure of merit eventually forced everybody to appreciate the need for high-quality single crystals as the only acceptable device material. Shockley and most of his colleagues initially argued vociferously for a polycrystalline technology; single crystals would be too expensive to be accepted by the production-line colleagues. Later they all agreed with their opposition, with Gordon Teal being the main spokesman (45). The stage was set for materials research, supplying excellent crystal quality, maintaining purity, enabling defect control.

Respectability Achieved

Those irreproducible mavericks of semiconductors had now been elevated to respectable objects of physics, finally, after centuries of cinderella humiliation. The idiosyncrasy against foreign admixtures had been converted into a viable, predictable doping technology. When Shockley's suggestion of carrier injection by a *p-n* junction – instead of a point contact – succeeded in practice, junctions could be quantitatively described without any artificial fitting parameters (20), linking current *I* to applied voltage *V* by

$$I = I_0 (\exp \langle qV/kT \rangle - 1), [1]$$

this *ideal rectifier equation* was strictly obeyed by junctions in germanium. A rapidly rising forward current with positive values for *V* contrasts with an essentially constant reverse current for negative *V*. Thermally activated transmission over a potential barrier was proven with the dependence on temperature *T*. The prefactor *I*₀ was shown to be calculable with the input of carrier parameters, such as densities and lifetimes.

The glory of this early transistor-related research hence resided not in the device itself, which failed to quickly expel the tubes from their sockets; it was rather the success in materials understanding by the *scientific approach to a practical prob-*

lem, a gospel incessantly preached by Shockley to his teams of collaborators. The recalcitrant, unpredictable semiconductors were proven to be reproducible and domesticable materials, in spite of the actually disappointing first device realization!

Germanium versus Silicon

The teams at Bell Laboratories were devoted to germanium and silicon, since both elements had been proven useful in the radar development. It was soon clear that silicon would present some major advantages. In particular, the intrinsic density n_i , given by

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp(-E_g/2kT), [2]$$

where N_c and N_v are effective densities of state in conduction- and valence-band. The exponential dependence on the energy gap E_g indicated quite drastically that the much smaller gap $E_g(\text{Ge}) = 0.66 \text{ eV}$ would cause problems. Even at merely slightly enhanced temperatures, the intrinsic density rapidly rises and overwhelms any doping-induced, deliberately determined carrier density. The semiconductor then is out of control and just thermally dominated. Silicon, with $E_g(\text{Si}) = 1.12 \text{ eV}$ is a better choice for stable operation. Yet, germanium was chosen for the first transistor, and for good reasons. With its melting point at $937 \text{ }^\circ\text{C}$, Ge is so much easier to be prepared than Si with $T_m = 1.415 \text{ }^\circ\text{C}$. Silicon binds chemically so strongly to oxygen that its elemental synthesis is difficult. Germanium also has valuable properties, which were significant in the birthday on December 23, 1947: a markedly higher electron mobility $\mu_e(\text{Ge}) = 3.900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ than that of silicon, being only $\mu_e(\text{Si}) = 1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. With the Einstein relation

$$D = \mu (kT/q), [3]$$

linking diffusion coefficient D to drift mobility μ , germanium evidently provided a much better chance for an injected carrier to penetrate deeply into the bulk, to reach a collector and thus enable transistor action.

Germanium had such nice, convenient properties, that the production engineers loved this material. Highly automated lines, such as the one at Philco Corp., where the young Robert Noyce did his apprentice years (46), or the European production lines, like those of Siemens in Munich, used alloying and clever etching techniques for profitable mass production. No wonder that by 1965 – when Fairchild, TI, and others had already been offering silicon transistors for some time (47) – germanium devices with 334 million units annual sales still outsold silicon transistors with only 275 million pieces (2). Germanium devices populated hearing aids, pacemakers, and radios; they also gradually invaded the computer markets with diodes and transistor logic (3).

Enticing Silicon Anomalies

The competition among the group-IV elements shifted only slowly toward the more temperature-resilient Si (2). Bell Labs continued basic studies as well as device development; so did, for example, General Electric, where William Dash was a successful crystal grower (48); he used a "neck" to drive dislocations out of the seed to achieve dislocation-free Si. The new ventures in the Western USA, especially at Texas Instruments (45), devoted more attention to silicon, in part as a reaction to military demands for sturdier transistors.

A quirky anomaly of silicon initiated its colonization in Mountain View and Palo Alto of Santa Clara County in Northern California. Shockley stated that he had seen his "*name often enough in Physical Review, now was the time for the Wall Street Journal!*" (49). Mervin Kelly's old guideline was not forgotten: create a simple, cheap solid-state telephone switch! Silicon with its decidedly non-ideal current *versus* voltage relation could be advantageously utilized to create such switches. The deviations in Si from Eq. [1] are

$$I_0 \rightarrow I_0' \text{ and } \exp(qV/kT) \rightarrow \exp(qV/n kT). [4]$$

The currents described by Eq. [4] greatly exceed those of the ideal rectifier because carrier recombination and generation provide efficient competitive paths against pure thermal activation. The slope of $\log I$ against applied forward voltage V is sharply reduced by the factor n in the exponential, again because of the extra current paths via recombination of electrons and holes at centers within the junction's space charge layer. These effects are particularly pronounced for low applied voltages; at higher bias, thermal activation dominates. The parameter n approaches 2 asymptotically. (This parameter, unfortunately, carries a misnomer: *ideality factor*, although the higher n , the less ideal the junction.)

These deviations from ideal junction behavior make many features a function of junction current, such as for transistor current gain $\alpha(I)$. This fact produces a pronounced bistability in a four-layer p - n - p - n two-terminal diode (50). The detailed story of Shockley's hope in a now defunct device is presented in a symposium by Kurt Hubner, who contributed much development work to this four-layer-diode in Shockley's little company (50). Shockley had left Bell Laboratories, spent some time as a government consultant on weapons systems evaluation first and at that time published a controversial, irritating study on the statistical distributions of human creativity (51). Then, he received the support of his school-mate Arnold O. Beckman (6) in setting up his own little silicon-oriented company in an old apricot storage barn on 391 South San Antonio Road in Mountain View (52), as seen in Figure 4 – plus some facilities for production in the so-called *Spinco-Building* of the Beckman Instruments Corporation in Palo Alto (6, 50). Silicon had established its foothold in California!

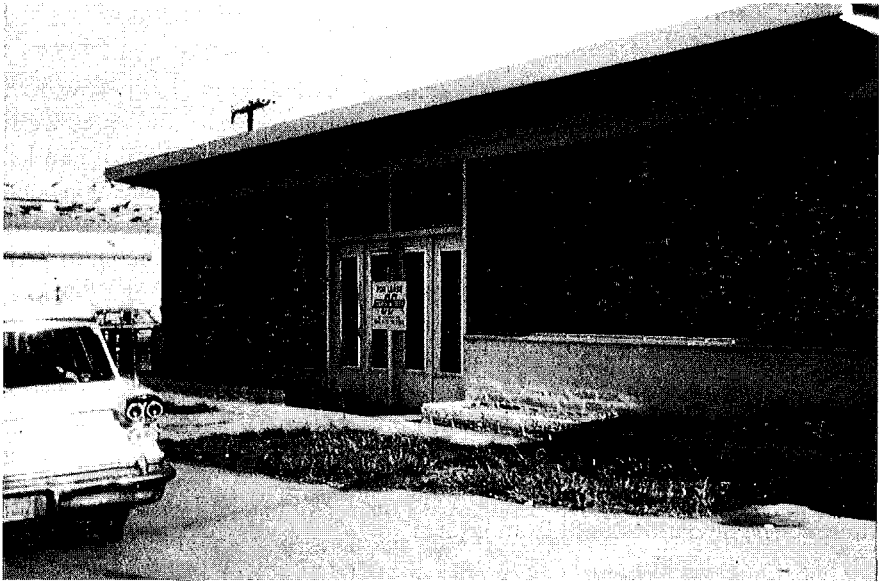


Figure 4

The laboratories of the Shockley Transistor Corporation,
located on 391 South San Antonio Road in Mountain View, California –
a former fruit storage barn, see Ref. (52)

The risky venture with the bistable diode floundered (4–6, 50). Silicon had now been advanced sufficiently to be applied to traditional silicon mesa transistors. This alternative was suggested by Shockley's hand-picked elite crew – but Shockley rejected this rebellious plan. Bob Noyce, Gordon Moore, Jay Last, Vic Grinich, Murray Siegel, Sheldon Roberts, Jean Hoerni, and Eugene Kleiner, condemned by Shockley as the *Traitorous Eight* seceded and formed Fairchild Semiconductors with help of financier Hayden Stone. This fateful rebellion of 1957 (4, 6), often repeated as division and multiplication, stimulated growth of *Silicon Valley*. The Fairchild team contributed tremendously to silicon technology: planarization and use of silicon's greatest asset: its stable, strong oxide – a story retold by Bruce Deal (47) – finally the integration and connections of so many functions in the crystal interior, as related by Jack Kilby (53).

*Stubborn Continuation: Materials Research**Strategy of Fundamental Studies on Silicon*

Shockley did not capitulate, in spite of a serious breakdown after the secession (6). The four-layer switch remained the goal, and intensive materials research had to show the way. He hired a number of new scientists, many of them from Europe, who were not exactly "slaves" to master Shockley (54), but less experienced with ventures in the USA, hence less likely to secede. I was one of them, joined in 1959 with the task to look at defects in silicon. Thin layers were a definite goal, which appeared endangered by dislocations causing short circuits to diffusions as well as to carrier currents. Point defects had to be understood and prevented, since they exercised strong control of junction currents. Surfaces had to be clean and protected. Shockley's sales of four-layer-diodes could not support extensive basic and applied research. However, the *sputnik shock* had come, and money was suddenly available from government agencies to catch up with Soviet space technology. Shockley applied for these grants and was quite easily successful. Fairchild, on the other hand, did not rely on such outside money; proprietary techniques were sought with internal financing and with handsome profits from selling the first planar Si transistors to the military customers (47).

Solar Cells with Silicon

The solar cell, a large-area Si device, was invented at Bell Labs by D. M. Chapin, Calvin Fuller, and Gerald Pearson (55), but found little use in the Bell System (trials for battery replacement at Americus, Georgia (56) failed because of coverage by opaque pigeon excrements!) nor by the US Armed Forces, who saw no interest in this feeble power-supply. The cold-war archenemy Soviet Union, however, paid serious attention. The US situation was altered after the launching of *Sputnik* on October 4, 1957 with its *p on n*-Si solar cell, which Soviet scientists had made after the Bell recipes (57). Air Force (at Dayton, OH) and Army (at Ft. Monmouth, NJ) were particularly active in solar cell work and as contract sources. I worked for both these agencies in my initial projects at Shockley's little barn in Mountain View. Shockley's interest was not in a new, additional product; he took the money (less than 50,000 \$, imagine!) to enhance silicon methodology. Many space-experts deemed semiconductor solar cells inferior sources; a compact, low-weight nuclear reactor seemed the candidate to beat for unmanned missions (58). Large-area Si sheets, to be pulled (like glass) from a Si/Pb melt, were proposed by Shockley (59). Such sheets ought to support many cells, connected in series

for enhanced output voltage. In anticipation, we made a multicell from a very thin, $60\ \mu\text{m}$ piece of silicon. Masking with sprayed-on black wax and with Kodak photoresist provided for double-diffused structures, as shown in Figure 5. I struggled days and nights, succeeded in getting half a dozen devices, which actually delivered up to six volts output through the series connections of $p-n$ junctions (60). I gave a report in Palo Alto at Rickey's Hotel on El Camino Real (a small room sufficed) in a local IRE chapter semiconductor meeting (61). Bob Noyce came just for my talk, asked no questions and left. I was surprised to have this silent auditor from Fairchild. Now it seems more understandable, in view of the ideas and the patents on integrated circuit ideas at that time (62). We had achieved a somewhat bizarre, but certainly a working *integrated circuit*! We should have published it, applied for some sort of patent claims. But at that time, Shockley and his people had other worries; we were just being sold off from Beckman to Clevite Corporation (63), barely surviving. The tournament of patents was ceded to Noyce and Kilby (62).

My second project was more theoretical. The limiting efficiency for solar cells was not clarified. Only empirical estimates existed, hence it was also not firmly established which was the optimal material for solar energy conversion – as determined by the band gap energy for best matching to the solar spectrum. Silicon was con-

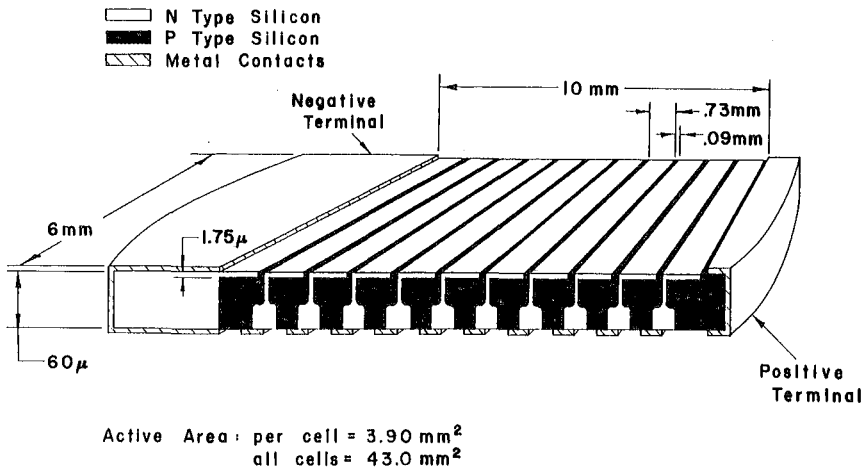


Figure 5
Multicell Solar Battery, produced at the Shockley Transistor Corp. in 1960,
see Ref. (60)

venient; yet others, especially the very active group at RCA (64) and the Clevite people in Cleveland (65), favored higher gaps E_g , as in $A^{III}B^V$ or $A^{II}B^{VI}$ compounds. We proposed a thermodynamic theory, based on the idea that an ideal material would be one having only radiative recombination as required by the principle of detailed balance. Our paper was eventually accepted (66) after struggles with the referees, it now seems to have been recognized and has been reprinted several times (8). Silicon came out very close to the optimum (67).

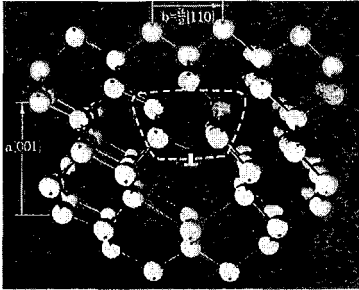
Dislocation Fears and Follies

I was supposed to work on defects, a topic related to my thesis at Göttingen. Dislocations were extremely worrisome then. These line defects were thought to consist of a series of dangling bonds, which were hypothesized to be acceptor states. A p -type short circuit would thus traverse a narrow base from emitter to collector; horrible threat for high-frequency devices! My studies on junctions with and without dislocations gave relief (68). Dislocations by themselves were not necessarily harmful. Impurities, especially heavy metals, however, tend to precipitate out around dislocations – and those precipitates badly deteriorate junctions (69). Oxygen also precipitates at dislocations of a grain boundary and may actually invert the polarity of a photovoltage originating at the junction (70). Metals and oxygen in Si had thus to be monitored and to be kept under tight control, just as the donors and acceptors had to be controlled.

Diffusion, nowadays recognized as a decisive step forward from simple alloying of dopants, was a vivid topic already in the late fifties. Again, dislocations gave worries, since they might provide a path for more rapid diffusion and junction advancement than in the undislocated bulk. We made arrays of dislocations by growing bi-crystals out of the melt and then studied junction profiles (71). Indeed, as seen in Figure 6, sharp spikes are observed; dopants diffuse much more rapidly near grain boundaries! Figure 6 is really a job offer advertisement, published in a series in *Physics Today*. Shockley tried to lure researchers with examples of this scientific, yet applicable work towards Mountain View.

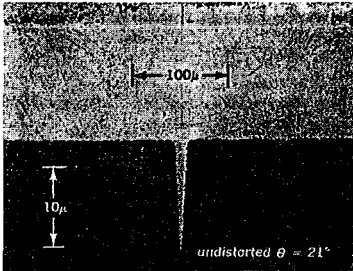
Multiple diffusions of donors and acceptors near grain boundaries gave me some rather fancy structures, some with very narrow-looking base layers. They failed as good transistors with high cutoff frequencies, the junctions were soft and not under sufficient control (68). There was a motive behind our work. Shockley had filed a patent in which he claimed that a material with a "non-zero Burgers vector" ought to be useful for high frequency transistors. A cylinder of, say, p -type doping would constitute the smallest possible base region. The dislocation should help to make functional structures of atomic dimensions – a dream eventually realized in

DIFFUSION DOWN DISLOCATIONS



What is the core of a dislocation in silicon like? Does it have unpaired electrons in dangling bonds, or do the electrons pair up as in the model we constructed to illustrate Hornstra's¹ theory? Impurities diffuse down dislocations faster than through the bulk. Is the cause an extra concentration near the dislocation-core of impurities or vacancies or both? Are dislocations good or bad for semiconductor device development? Can they be used as guides for diffusion to produce new and useful structures?

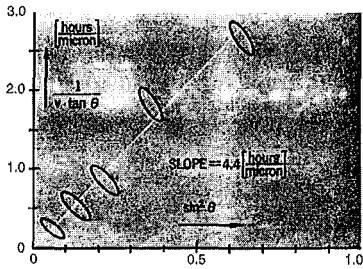
We are trying to get answers to these questions by studying diffusion down small-angle grain boundaries in silicon composed of spaced edge dislocations. We have found a simpler way² of measuring the constants describing diffusion on the boundary by making p-n junctions through phosphorus diffusion into p-type silicon. The p-n junction is a



1. J. Hornstra, *J. Phys. Chem. Solids* **5**, 132 (1958).
 2. K. Hubner and W. Shockley in *Structure and Properties of Thin Films*, (Wiley, New York, 1959), p. 302; *Bull. Am. Phys. Soc. Ser. II*, **4**, 409 (1959).
H. Queisser, K. Hubner and W. Shockley (to be submitted to *Phys. Rev.*).
 3. A. H. Cottrell, *Dislocations and Plastic Flow in Crystals*, (Clarendon, Oxford, 1953), p. 56.
- (Publications of reference 2 describe results obtained under contract with the Air Force Cambridge Research Laboratory.)

phosphorus isoconcentration line that can be revealed by staining. The velocity v and the angle θ of the advancing spike are measured and the accompanying graph is made. The value of the slope of the straight line can be combined with Cottrell's theory³ of atmospheres around dislocations to reach the conclusion that most of the grain boundary diffusion current flows down the enclosed two atomic columns of maximum compression, the diffusion current density being 400,000 larger there than in the bulk.

We expect to achieve bigger current concentrations by using atoms like gallium or bismuth which have larger misfit factors in silicon than phosphorus has. We also expect to make transistors of various sorts using diffusion structures built on grain boundaries.



If increasing the fund of knowledge of atomic phenomena in silicon and at the same time helping get new devices to our customers challenges you, please let us know. We hope you have worked on semiconductors, but more important is your ability, general level of experience, and attitude.

For employment opportunities where this grain boundary work is being done, address your inquiries to:

Dr. William Shockley
Shockley Transistor, Unit of Clevite Transistor
Stanford Industrial Park, Palo Alto, California

For other Clevite opportunities in the semiconductor field, write Placement Director at:

Clevite Transistor, Waltham 54, Massachusetts

Clevite Research Center
540 East 105th Street, Cleveland 8, Ohio

Intermetall G. m. b. H.
Hans-Bunte-Strasse 19
Freiburg/Breisgau, West Germany

Shockley TRANSISTOR

UNIT OF CLEVITE TRANSISTOR
STANFORD INDUSTRIAL PARK, PALO ALTO, CALIFORNIA



Figure 6

Job offer advertisement: Spike of a diffusion performed in a silicon bicrystal, see Ref. (71)

the nineties with quantum wires. Technology in the sixties was much too crude, but we tried.

I wanted to do some surface etching of my bicrystals and asked my colleagues in the Shockley barn under what conditions such etching arose. Heavy boron diffusions seem to do so, was the answer. I looked into it, indeed there appeared strange crosshatch patterns, which followed crystallographic directions, as I clearly saw through the difference of orientations in the two grains. I soon found that those heavy doses of undersized B acceptor atoms inside the Si lattice created so much strain that slip arose: dislocations moved into the lattice to relieve the mechanical strain. People did not believe this idea at first; again we fought with referees and eventually my paper was accepted (72). The real proof for dislocations came through a nice transcontinental cooperation with Gunter Schwuttke, then at General Telephone Corp. in Bayside, NY, expert in defect identification through X-ray diffraction topography (73); for reviews, see also Refs. (68, 74).

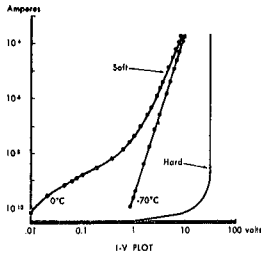
Punctilio in Point Defects

Foreign atoms are difficult to avoid in silicon devices, especially after oxidation and diffusion treatments became essentials in processing. The hot furnaces would inevitably contaminate the crystal, however purely it might have been grown. Silicon junctions, with their no longer neglectable junction space charge layers, are sensitively affected by even very small amounts of such impurities with their deep electronic levels, which facilitate carrier generation and recombination. The first outstanding scientific publication out of early Silicon Valley explained the irregular features of silicon junction, see Eq. [4]. The non-ideal junctions were quantitatively explained by Sah, Noyce, and Shockley (72). A few days after this paper had appeared in print, Robert Noyce and his colleagues left the luckless Shockley company and started with Fairchild (4, 76). C.-T. Sah still stayed for a little while in the old barn on San Antonio Road.

Combat had to be declared to the metallic contaminations. How had the vacuum tube producers cleaned their active volumes? By "gettering" the residual gases! Fortunately, similar recipes work inside the silicon crystal. Impurities bind strongly to dislocations, to precipitated oxygen, to surface damage, to glassy phases near the surface. Gettering was studied judiciously by Adolf Goetzberger and proven useful in hardening "soft" junctions, meaning that very low reverse currents and sharp avalanche breakdowns could be obtained by confining the metals to regions outside the active crystal portions (77). The forward characteristics are similarly affected (78). Figure 7 shows a drawing, again taken from a job offer advertisement in *Physics Today*, with the proof of excess currents flowing through the

Reprinted from PHYSICS TODAY, Vol. 13, No. 11, November, 1960
 Printed in U. S. A.

Basic or Applied?



Why did our p-n junctions sometimes come out "soft"? This was a practical question. But it also interfered with research on avalanche breakdown processes and on studies of thin diffused layers. The quantitative form of the current voltage characteristics suggested tunnelling or Zener currents rather than secondary ionization or avalanche. What could produce the necessary high field? Perhaps metal precipitates like those Dash observed on dislocations.¹ This hypothesis was confirmed by deliberately introducing metals. Furthermore, the "soft" current of the I-V plot flows only in a small region of the mesa diode, as shown by probing.²

Once it was known that metal precipitates cause the soft current, ways were found to get rid of them³.

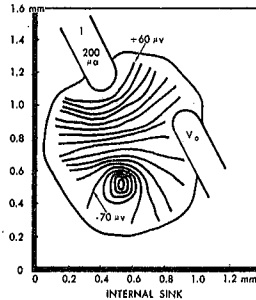
This is an example of the type of research we are trying to do more of. It is both basic and applied.

1. W. C. Dash, J. Appl. Phys., 27, 10, 1193 (1959)
 2. A. Goetzberger and W. Shockley, Structure and Properties of Thin Films (John Wiley, (1959), pp. 298-301, and Bull. Am. Phys. Soc., Ser. II, 4, 409, (1959)
 3. A. Goetzberger, Bull. Am. Phys. Soc., Ser. II, 5, 3, 160 (1960) and A. Goetzberger and W. Shockley, J. Appl. Phys. (in press).
- (Publications 2 and 3 describe research on contract with the Air Force Cambridge Research Center.)

So are the activities of our research and development leaders. Most of them split their time between publishable research and new device development.

If increasing the fund of knowledge of atomic phenomena in silicon and at the same time helping get new devices to our customers challenges you, please let us know. We hope you have worked on semiconductors, but more important is your ability, general level of experience, and attitude.

By the way, we are not through with the metal precipitates. How big are they? What is their shape? Are they wholly in the space charge layer or do they stick in from one side? Can we control them and use them? Do they reduce the efficiency of solar cells? We could use more scientific manpower on these problems.



Address your inquiries to:

Dr. William Shockley
 Shockley Transistor, unit of Cleveite Transistor
 Stanford Industrial Park, Palo Alto, California

or for East Coast opportunities to:
 Engineering Placement Director
 Cleveite Transistor
 Waltham 54, Massachusetts

Shockley TRANSISTOR

UNIT OF CLEVITE TRANSISTOR
 STANFORD INDUSTRIAL PARK, PALO ALTO, CALIF.

Figure 7
 Job offer advertisement: the physics of "soft" junctions

precipitates. Gettering with its scientific foundations has remained an important and active field of current research. Of utmost significance is the gettering via oxygen precipitates, which creates a denuded, clean zone near the wafer surface for housing the elements of dynamic random-access memories. Present technologies still heavily rely on this somewhat embarrassing, yet pragmatically successful processing trick.

Errors in Epitaxy

Much useful knowledge still flowed from the big East Coast laboratories, especially from Murray Hill and Allentown, toward Silicon Valley. Shockley had some licensing and know-how arrangement with Bell Labs, he and his staff went there for regular snooping and enlightenment. Much quantitative information was acquired, such as solubilities and energy levels of dopants, diffusion coefficients and dopant profiles, mobilities as functions of doping levels, measurement methods. Of special importance to us were crystal growth techniques, epitaxy above all, first reported for a device by Henry Theuerer and his colleagues (79). Myself being the materials person in the now much more presentable Shockley Labs on Page Mill Road in the Stanford Industrial Park, I had set up the equipment to grow epitaxial layers for the power transistors, now explicitly expected from us by our Clevite mother organizations in Waltham, Mass. and Freiburg, Germany.

Epitaxy brought new defects, new problems. The interface was difficult to control, the materials quality initially quite poor. Desperation led Richard Finch and myself to invert the process, making heavily doped layers for the collector portion and then mechanically polishing the lowly doped substrate down to a few microns thickness (80). This "inverse epitaxy" is quite similar in spirit to today's wafer bonding technique; our unwieldy makeshift method overcame a serious bottleneck until epitaxy became better controlled.

New, beautiful-looking triangular defects cropped up in epitaxy on (111) – surfaces. They grew in size with increasing layer thickness. By that time, I had learnt enough about defects in solids to identify these tetrahedral defects as stacking faults (81). Special dislocations, some even bearing the name of the boss as "Shockley partials", mark the intersections of the (111) planes. We found with electrical measurements and with direct visual microscopic observations of soft-glowing microplasma breakdown (82) that the faults themselves were harmless, just as I had previously seen on coherent grain boundaries in Si (83), but precipitates of metals at these "stair-rod" partial dislocations were – once again – culprits for damaging the $p-n$ junctions.

Everyboy, myself included, constantly searched for new methods to identify and characterize defects in Si. Ours was a small lab with limited budgets for equipment. We used an old loudspeaker to construct a pretty Kelvin probe for studying ion motion above junctions (84). I liked electron microscopes, since I had been a technician (4) with Ernst Ruska in Berlin, inventor of this microscope and later a Nobel laureate. I realized we could never buy our own, but also knew that experts at UC Berkeley had some Siemens microscopes, so I went there with 15 neatly etch-thinned Si samples and begged Jack Washburn and Gareth Thomas to inspect them. Nothing to be seen, silicon is just so much more perfect than the metals – people had already warned me. But sample number 13 graciously presented us the beautiful triangle of a stacking fault – actually the first high-resolution image of any defect in Si, suggesting us a model to explain fault growth as initiated by surface oxide (85). Figure 8 gives an example. We also investigated my favorite foes, those diffusion-induced slip dislocations (86). Electron microscopy is today a routine tool, indispensable to check crystal integrity; thus it pleases me a little to remember these still crude, but very first observations in our Cal-Stanford collaboration (87).

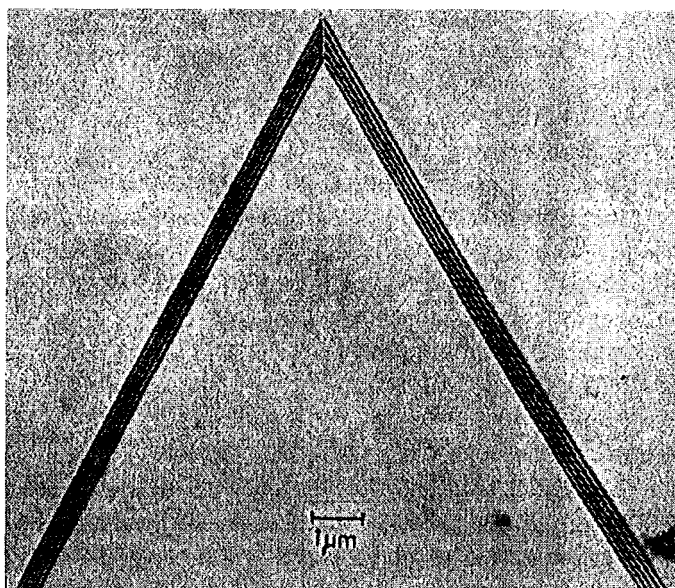


Figure 8

Early transmission electron microscope view of an oxidation – induced stacking fault, compare Refs. (85, 86)

Finale

Understandably grateful I am to have had a chance to participate in this awe-inspiring development of silicon microelectronics. Had anybody offered me a bet that one day we would have millions of transistors, yes: field-effect transistors, in circuits, fabricated with yields close to 100 per cent, I would have laughed unbelievably. But Shockley always admonished us, as he had done to our predecessors then at Fairchild, not to be too discouraged by the grim reality of daily lab disappointments. He insisted that ideas can be realized by proper engineering unless physics principles – such a thermodynamics or quantum theory – are violated. If economic incentives suffice, things can eventually be miniaturized within silicon. At an American Physical Society meeting in Pasadena, around Christmas 1959, Shockley introduced me to a former outstanding student of his, Richard Feynman, who encouraged us with his charming after-dinner speech under the now famous motto "*There is Plenty of Room at the Bottom!*". Indeed, semiconductor crystals do provide plenty of room for electronic functions, ever more miniaturized (88). Materials research was – and still is – probably the most essential part of the finally successful story of microelectronics. The materials resisted so often the seemingly straightforward device concepts. Martin Lepselter's perpetual dictum over the lunch tables in the Murray Hill and Allentown cafeterias still rings in my ears: "*The materials people's concern is materials, but the device people's concern is ... materials!*" The retrospective of 50 years of transistors lends some credence to this axiom. The *silicon age* differs from the stone age, the bronze age, the iron age. For us it was a strict, relentless scientific approach, not busy empirical attempts, which paved our way. Shockley demanded "*scientific aspects for practical problems*", but sometimes obviously and tragically neglected economic reality. Frederick Seitz honors his tragic role in calling him the "*Moses of Silicon Valley*", showing the way to a promised land but not reaching it himself. Modern semiconductor technology and business were achieved by great armies of researchers and engineers, and also financiers, who followed the mere handful of pioneers fifty years ago. Maturing technologies always become anonymous affairs, while the early forefathers are personally basking in glory. This natural course of events should not be construed as unfair; we all belong to a family of scientists working for a remarkable, a useful and peaceful, a demanding and rewarding cause. This quest will continue, maybe as lively for the next fifty years as in the previous half century.

References

- 1 W. Shockley: IEEE Trans. Electron Devices ED, 23, 611 (1976).
- 2 E. Braun & S. Macdonald: Revolution in Miniature, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1978.
- 3 P. R. Morris: A History of the World Semiconductor Industry, London: Peter Peregrinus Ltd., 1990.
- 4 H.-J. Queisser: The Conquest of the Microchip, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1988; the German original: Kristallene Krisen, Munich: Piper, 2nd ed., 1987 is more detailed.
- 5 L. Hoddeson et al. (eds.): Out of the Crystal Maze, Oxford: Oxford Univ. Press, 1992.
- 6 M. Riordan & L. Hoddeson: Crystal Fire, New York: Norton, 1997.
- 7 F. Kurylo & C. Susskind: Ferdinand Braun, Cambridge, MA: MIT Press, 1980.
- 8 S. M. Sze (ed.): Semiconducting Devices, Pioneering Papers, Singapore: World Scientific Publ. Co., 1991; the reprint (translated by H.-J. Queisser) of F. Braun's paper (1874) is on page 377.
- 9 C. A. Winkler: Ber. dtsh. chem. Ges. 19, 210 (1886); a biography is: H. C. A. Winkler et al. (eds.), Clemens Winkler, Berlin: Akademie Verlag, 1954, (Vol. D 8 of "Freiberger Forschungshefte"). Note that Winkler's Ph. D. thesis (1864, Univ. of Leipzig) concerned Si and Si compounds!
- 10 C.-T. Sah: Proc. IEEE 76, 1280 (1988) is a detailed description of the genesis of field-effect transistors.
- 11 See, e.g. C. Susskind: IEEE Spectrum, 6, 69 (1969) or H. Pratt, IEEE Spectrum 5, 52 (1968).
- 12 "Die Schande des Detektorproblems", private communications by W. Schottky & E. Spenke to H.-J. Q.
- 13 See Ref. (6), chapter 6 ("*The Fourth Column*") for details.
- 14 H.-J. Queisser: Siemens Forschungs- u. Entwicklungsberichte 15, 272 (1986) (in a commemorative issue on W. Schottky), also: E. Feldtkeller & H. Goetzeler, Pioniere der Wissenschaft bei Siemens, Publicis MCD Co., Erlangen, Germany (1994) ISBN 3-89578-006-5, p. 70 on W. Schottky, p. 147 on E. Spenke, p. 118 on silicon R&D at Siemens from 1951 to 1957.
- 15 F. Seitz: On the Frontier, New York: AIP Press, 1994.
- 16 S. Kyropoulos: Z. anorg. u. allg. Chemie 154, 308 (1926), Z. Physik 154, 308 (1926); see Ref. (5), p. 304.
- 17 J. Czochralski: Z. phys. Chemie 92, 219 (1918).
- 18 N. F. Mott: Proc. Cambr. Philos. Soc. 34, 568 (1938).
- 19 W. Schottky, Naturwiss. 26, 843 (1938), also: see Ref. (13).
- 20 W. Shockley: Electrons and Holes in Semiconductors, New York: van Nostrand, 1950.
- 21 J. E. Lilienfeld: US Patent 1 745 175, filed October 8, 1926 (see Ref. 10 for details).
- 22 O. Heil: Brit. Patent 439457, filed March 4, 1935 (see Ref. 10).

- 23 W. Shockley, notebook entry, Bell Telephone Labs, 29 December 1939, see reprint in the proceedings of this symposium, chapter 2.1 ("*Pre-World War II*"), also Ref. (6).
- 24 Robert A. Watson-Watt: *Three Steps to Victory*, London: Odhams Press, 1957.
- 25 F. Seitz: *Modern Theory of Solids*, New York: McGraw-Hill, 1940, also Ref. (14) and quotes in Ref. (26).
- 26 L. N. Ridenour (ed.): *Crystal Rectifiers*, MIT Radiation Lab. Series, Vol. 15, New York: McGraw-Hill, 1948.
- 27 H. Bethe (Ref. 26, p. 72): *Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers*, Rad. Lab. report 43-12, November 23, 1942.
- 28 See, e.g. Ref. (14); also Ref. (5), p. 457.
- 29 R. Bray: *A Case Study in Serendipity*, ECS Interface 6 (1), 24 (Spring 1997), but compare W. Shockley: *The Invention of the Transistor – an Example of Creative Failure Methodology*, special publication no. 388, US. Natl. Bureau of Standards (1973), esp. chapter "speculation and anecdotes". Also: Refs. (5, 6).
- 30 J. Stuke: *Zur Eigenleitung elektronischer Halbleiter*, Doctoral thesis, University of Göttingen, July 1947, comments on its fate in Ref. (5), p. 458.
- 31 The term *operations research* was coined by Shockley during his wartime antisubmarine work.
- 32 *A History of Engineering & Science in the Bell System*, several volumes. AT&T Bell Labs (1983–1985).
- 33 W. Shockley, see Refs. (1) and (34).
- 34 Le Prix Nobel, speeches of acceptance (1956) by Bardeen, Brattain, Shockley, also Ref. (6).
- 35 W. Shockley: *The Invention of the Transistor*, see Ref. 29.
- 36 "FIAT (Field Information Agency, Technical) – reports on German Science (1939–1946)" were organized by the US Military Government; their number exceeds 2000. Volume 15, edited by G. Goubeau and J. Zenneck, describes semiconductors, esp. the work by P. L. Günther and G. Rebentisch, as quoted by K. Seiler, *Z. Naturforschung* 5a, 393 (1950).
- 37 Besides the work at Siemens, Wacker Chemicals, and AEG (Si power devices), there was a remarkable activity at SAF Corp. with growth of Si crystals and junction analysis in the early fifties, see, e.g. H. Kleinknecht and K. Seiler, *Z. Physik* 139, 599 (1954).
- 38 The *Siemens Prozess* of Si synthesis is described by D. Huber, San Diego symposium of the Electrochemical Society, May 1998, to be published; also E. Feldtkeller (14) and Ref. (36). The most important Siemens patents are: F. Bischoff, DBP 1102117, and H. Reuschel et al., DBP 1061593 (1954).
- 39 E. Spenke (see Ref. 14) is the author of an early textbook on semiconductors: *Elektronische Halbleiter*, Heidelberg: Springer, 1965.
- 40 H. Welker, *Physica* 20, 893 (1949).
- 41 M. Kikuchi: *A Worm's Eye View of Japanese Electronics*, Tokyo: Simul Press, 1983.
- 42 J. Bardeen & W. H. Brattain: *Phys. Rev.* 74, 230 (1948).

- 43 The kinetics of recombination of carriers followed the paradigm of plasma physics. W. Shockley & W. T. Read, Jr., Phys. Rev. 87, 835 (1952) and R. N. Hall, Phys. Rev. 87, 387 (1952) contributed the essential papers.
- 44 J. R. Haynes & W. Shockley: Phys. Rev. 81, 835 (1951).
- 45 G. K. Teal: IEEE Trans. Electron Devices ED - 23, 621 (1976).
- 46 A journalistic biography on R. N. Noyce is in: Esquire, December 1983, p. 346. Large-size photos of Noyce and many other pioneers are in: C. Caddes, Portraits of Success, Palo Alto: Tioga Publ. Co, 1986.
- 47 B. E. Deal & A. S. Grove: J. Appl. Phys. 36, 3770 (1965).
- 48 W. C. Dash: J. Appl. Phys. 29, 736, (1958).
- 49 W. Shockley, private communications.
- 50 K. Hubner: contribution to the San Diego Symposium, Electrochem Soc. (1998), to be publ.
- 51 W. Shockley: On the Statistics of Individual Variations of Productivity in Research Laboratories, Proc. IRE 45, 279-290 (1957).
- 52 My amateur photos of the Mountain View "barn" are reproduced in Refs. (4) and (6).
- 53 J. St. Clair Kilby: contribution to ECS Symposium, San Diego (1998).
- 54 J. L. Gibbons: on European master-slave relations, quoted in Ref. (6), 269.
- 55 D. M. Chapin, C. S. Fuller & G. L. Pearson: J. Appl. Phys. 25, 676, (1954).
- 56 A brief historical review on solar cells is: F. M. Smits: IEEE Trans. ED - 23, 640 (1976)
- 57 V. S. Vavilov, personal communications (*ca.* 1994).
- 58 See, *e.g.* Energy Conversion for Space Power, N. W. Snyder (ed.), New York: Academic, 1961.
- 59 The fabrication of large-area Si sheets from binary melts was studied by our partner Grace R&D Co., Contract DA 36-039-SC-85242, US Army Signal Corps, Ft. Monmouth NJ.
- 60 H.-J. Queisser: Final Report, US Army Signal Corps *Multicell Solar Energy Converter*, contract DA 36-039-SC-85239 (awarded 6 October 1959), also: Photovoltaic Multiplicities, in: Future Generation Photovoltaic Technologies, R. D. McConnell (ed.), AIP Conf. Proc. Woodbury, NY 404, 267 (1997).
- 61 H.-J. Queisser: unpublished oral presentation (spring 1960).
- 62 J. S. Kilby: IEEE Trans. ED - 23, 648 (1976).
- 63 Ref. (6) p. 269, Clevite Corp. bought Shockley Transistor Corp. in April of 1960.
- 64 J. J. Loferski & P. Rappaport: RCA Review 19, 536 (1958), also see Ref. (55).
- 65 L. R. Shiozawa et al. (govt. reports) reprint in C. E. Backus, Solar Cells, New York: IEEE Press, 1976.
- 66 W. Shockley & H.-J. Queisser: J. Appl. Phys. 32, 510 (1961).
- 67 A reappraisal is: J. H. Werner, S. Kolodinski & H. J. Queisser: Phys. Rev. Lett. 72, 3851 (1994).
- 68 H.-J. Queisser: Festkörperprobleme II, F. Sauter (ed.), 162 (1963), also H.-J. Queisser in: Defects in Semiconductors II, S. Mahajan & J. W. Corbett (eds.), Mat. Res. Soc. Symp. Vol 14, 323, North Holland, NY (1983) (detailed review on dislocations and their electrical properties in semiconductors).

- 69 H.-J. Queisser: *J. Electrochem. Soc.* 110, 52 (1963).
- 70 H.-J. Queisser: *J. Phys. Soc. Japan* 18, Suppl. III, 142 (1963).
- 71 H.-J. Queisser, K. Hubner & W. Shockley: *Phys. Rev.* 123, 1245 (1961), also Ref. (68).
- 72 H.-J. Queisser: *J. Appl. Phys.* 32, 1776 (1961), earlier: *Bull. Am. Phys. Soc.* 6, 106 (March Meetg. 1961).
- 73 G. H. Schwuttke & H.-J. Queisser: *J. Appl. Phys.* 33, 1540 (1962).
- 74 H.-J. Queisser: *Perfecting the Solid State*, *Annual Review Material Sci.* 22, 1 (1992).
- 75 C.-T. Sah, R. N. Noyce & W. Shockley: *Proc. IRE* 45, 1228 (1957).
- 76 Ref. (6) , chapter 11: "California Dreaming".
- 77 A. Goetzberger & W. Shockley: *J. Appl. Phys.* 31, 1821 (1960); also: G. Bemski, US Patent 2 827 436, (filed January 16, 1956), refers to gettering of Au by Ni plating of Si. A recent summary is: K. Graff: *Metal Impurities in Silicon Device Fabrication*, Heidelberg: Springer, 1995.
- 78 H.-J. Queisser: *Z. Physik* 176, 313 (1963); W. W. Hooper & H.-J. Queisser: *Proc. IRE* 50, 486 (1962).
- 79 H. C. Theurer, J. J. Kleimack, H. H. Loar & H. Christensen: *Proc. IRE* 48, 1642 (1960).
- 80 R. H. Finch & H.-J. Queisser: *J. Electrochem. Soc.* 110, 216 C (1963), *Electrochem. Techn.* 2, 114 (1964).
- 81 H.-J. Queisser, R. H. Finch & J. Washburn: *J. Appl. Phys.* 33, 1536 (1962); W. C. Dash, *J. Appl. Phys.* 33, 2395 (1962).
- 82 H.-J. Queisser & A. Goetzberger: *Phil. Mag.* 8, 1063 (1963).
- 83 H.-J. Queisser: *J. Electrochem. Soc.* 110, 52 (1963).
- 84 W. Shockley, H.-J. Queisser & W. W. Hooper: *Phys. Rev. Lett.* 11, 489 (1963).
- 85 Ref. (81) and: J. Washburn, G. Thomas & H.-J. Queisser: *Appl. Phys. Lett.* 3, 44 (1963); R. H. Finch et al.: *J. Appl. Phys.* 34, 406 (1963).
- 86 J. Washburn, G. Thomas & H.-J. Queisser: *J. Appl. Phys.* 35, 1909 (1964).
- 87 An (accidental) photographic proof of this Stanford-Cal cooperation is on the cover of *Fortune* magazine, September 1965, showing me (in a crowd), returning from an experimental session through Sather Gate in Berkeley.
- 88 R. P. Feynman, speech at the American Physical Society Meeting ("in the West"), Pasadena, CA, December 29, 1959; reprinted in: *Engineering and Science*, February 1960, p. 22.

*Einführung zur Akademievorlesung
von Reinhard Hüttl am 17. April 1997*

Dieter Simon

Präsident der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften

Meine Damen und Herren,

was vom Wald überhaupt zu halten sei, darauf hat uns Joseph Freiherr von Eichendorff (1788–1857) im frühen 19. Jahrhundert hingewiesen:

*„Wer hat dich, du schöner Wald,
aufgebaut so hoch da droben?
Wohl den Meister will ich loben,
solang' noch mein Stimm erschallt.
Lebe wohl,
Lebe wohl, du schöner Wald!“*

heißt der nicht gerade unbekannte Anfang von *Des Jägers Abschied*. Die Botschaft scheint mir klar. Erstens: Man weiß eigentlich nicht so genau, wo der Wald herkommt, und zweitens: anscheinend ist ihm Lebewohl zu sagen.

Was im besonderen jetzt den deutschen Wald und dessen Funktion betrifft, so hat derselbe Eichendorff in demselben Gedicht folgendes ausgeführt:

*„Was wir still gelobt im Wald,
wollens draußen ehrlich halten.
Ewig bleiben treu die Alten.
Deutsch Panier, das rauschend wallt,
lebe wohl,
schirm dich Gott, du schöner Wald!“*

Auch hier können wir zwei Hypothesen aufstellen. Erstens: „*Ewig bleiben treu die Alten*“ könnte eine Anspielung auf die Akademie sein, die sich ehrlich bemüht, die in sie gesetzten Erwartungen zu erfüllen – auch wenn mir über entsprechende Gelöbnisse im Wald nichts bekannt ist, aber ich war auch nicht von Anfang an

dabei. Zweitens: der Wald als deutsches Panier ist jedenfalls bedroht, weshalb er Gottes Schutz anempfohlen wird.

Gottes Ratschlüsse sind bekanntlich den Menschen nicht immer offenbar, weshalb es sich empfiehlt nicht zuzuwarten, sondern selbst Hand anzulegen. In einer Akademie geschieht dies – wie unter Wissenschaftlern nicht anders zu erwarten – durch Befragung von Experten.

Ein solcher Experte ist offensichtlich Reinhard Hüttl, denn er ist der Leiter des Lehrstuhls für Bodenschutz und Rekultivierung an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, deren Prorektor er auch ist. Außerdem ist er ordentliches Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften – dort sind nur Experten.

Reinhard Hüttl wurde 1957 in Regensburg geboren und studierte Forstwissenschaften an der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg im Breisgau.

1983 erwarb er das Diplom und war während der folgenden zwei Jahre als Doktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Universität Freiburg tätig.

1986 wurde er dort mit einer Arbeit über das Thema „*Neuartige“ Waldschäden und Nährelementversorgung von Fichtenbeständen in Südwestdeutschland* zum Dr. rer. nat. promoviert. Hinter den „neuartigen Waldschäden“ verbirgt sich die offizielle, weniger emotionsbeladene Bezeichnung für das sogenannte Waldsterben; der Terminus soll vor allem die Multikausalität des Phänomens, die Vielzahl und Kombination seiner Symptome verdeutlichen. Eine wissenschaftlich verständliche, von mir gleichwohl mißbilligte Entscheidung. Schließlich ist unser Kulturexport in diesem Jahrhundert mehr als armselig. Nachdem es uns gelungen ist, den Russen unser „Butterbrod“ und den Engländern die „Gemutlichkeit“ aufzuschwatzen, sollten wir froh sein, daß die Franzosen endlich „Je Waldsterben“ sagen, und es ihnen nicht wieder ausreden.

Nach der Promotion blieb Reinhard Hüttl bis Ende 1992 als Freier Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Universität Freiburg. Gleichzeitig war er – seit 1986 – Leiter des internationalen Forstreferats der zur BASF-Gruppe gehörenden *Kali und Salz AG* in Kassel.

1991 erfolgte dann – permanent in Freiburg – die Habilitation mit einer Untersuchung über *Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika*. Hüttl erhielt die *Venia legendi* für Bodenkunde und Waldernährungslehre. Die Bodenkunde, auch Pedologie genannt (aus dem Griechischen: *to pedon* = „Boden“, „Erde“; ich hätte vermutet, daß das Wort aus dem Lateinischen kommt [die *pedes* sind natürlich mit dem *pedon* indogermanisch verbunden] und es sich um die „Lehre von den Fußkrankheiten“ handelt), befaßt sich – sehr allgemein formuliert – mit den Bestandteilen und Eigenschaften des Bodens, seiner Entstehung

und Veränderung sowie der Zuordnung zu Bodentypen. Die Waldernährungslehre ist ein Synonym für die stoffhaushaltsorientierte Waldökosystemforschung.

1993 wurde Herr Hüttl dann auf den Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung an der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität (BTUC) in Cottbus berufen. Der Bodenschutz umfaßt im weitesten Sinne alle Maßnahmen, die zum Schutz des Bodens unter dem Aspekt des Natur- und Umweltschutzes getroffen werden, z. B. Vorsorgemaßnahmen gegen Erosion und Nährstoffverarmung.

Brandenburg war ihm zu diesem Zeitpunkt bereits vertraut, denn er war 1992 Leiter des Blaue-Liste-Instituts für Wald- und Forstökologie im Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung in Eberswalde geworden, was er bis 1995 blieb.

An der Universität Cottbus wurde er mit dem Aufbau und der wissenschaftlichen Leitung des Zentralen Analytischen Labors der Fakultät betraut.

Diese Universität gehört zu den drei – allesamt neugegründeten – Universitäten in Brandenburg, die nach dem Willen des Wissenschaftsrates in dieser Zahl keinesfalls hätten errichtet werden dürfen. Sie wurde 1991 unter ihrem Gründungsrektor Günter Spur als östlichste Technische Universität Deutschlands eingerichtet und versteht sich mit ihrem ausgeprägt interdisziplinären Konzept ausdrücklich als eine Reformuniversität, deren integrierte, eng verzahnte Studiengänge auch geisteswissenschaftliches Spezialwissen für angehende Technikwissenschaftler vermitteln. Die anhaltend griesgrämige Haltung des ehemaligen Vorsitzenden des Wissenschaftsrates hat zu dessen Einladung nach Cottbus geführt – diese Einladung und die damit verbundene Besichtigung der jungen Hochschule hat ihm dann nachdrücklich den Mund gestopft, so daß er heute des Lobes voll ist.

Herr Hüttl engagierte sich von Anfang an im Aufbau der Universität und ihrer akademischen Selbstverwaltung: Von 1993–1995 war er Beauftragter für Forschung und wissenschaftlichen Nachwuchs, seit 1994 zusätzlich noch Beauftragter für Auslandsbeziehungen, als der er erfolgreich die Einbindung der BTUC ins internationale Forschungsnetzwerk betreibt.

Im Februar 1995 wurde er zum Prorektor für Forschung und wissenschaftlichen Nachwuchs gewählt.

Seine wissenschaftliche Arbeit stellte Reinhard Hüttl von Anfang an in einen internationalen Kontext. Seine hohe wissenschaftliche Kompetenz beruht u. a. auf Forschungsaufenthalten, die ihn bereits fast in die ganze Welt geführt haben. Er arbeitete in Europa u. a. in Schweden, Finnland, den Niederlanden und Frankreich; in den USA und Kanada, auf Neuseeland, in China und Indonesien, aber auch auf der russischen Halbinsel Kola sowie im afrikanischen Benin. Auch, was mich immer mit besonders schwarzem Neid erfüllt, eine Vertretung an der University of Hawaii war darunter.

Herr Hüttl ist also sehr weit vom Bild jenes deutschen Professors entfernt, der auf dem Heidelberger Philosophenweg perambuliert oder im geräuscharmen und abgedunkelten Zimmer über den Wald sinniert.

In Würdigung dieser wissenschaftlichen Leistungen wurde er in eine Reihe von wichtigen deutschen und internationalen Gremien aufgenommen – das Jahr 1995 brachte ihm eine wahre Flut solcher Auszeichnungen: Er ist seitdem Mitglied des Blaue-Liste-Ausschusses des Wissenschaftsrates und des Rates der Sachverständigen für Umweltfragen beim zuständigen Bundesministerium, einem Beratungsgremium der Bundesregierung in Fragen der Umweltpolitik, wo Herr Hüttl insbesondere für ökologische Aspekte der abiotischen Umweltmedien Boden, Wasser und Luft zuständig ist. Er wurde Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, deren Technikwissenschaftlicher Klasse er seit Anfang dieses Jahres in der Nachfolge von Hans-Günther Wagemann als Sekretar vorsteht. Er ist Stellvertretender Vorsitzender des Kuratoriums des Energieressourceninstitutes an der Universität Cottbus und Präsident des Bundesverbandes Boden e.V. Und er wurde in den internationalen wissenschaftlichen Beirat des Instituts für Umweltingenieurwesen der Polnischen Akademie der Wissenschaften berufen. Schon vorher gehörte er der Internationalen sowie der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, der Deutschen Botanischen Gesellschaft und dem Ausschuß „Luftverunreinigung und Böden“ des VDI, des Vereins Deutscher Ingenieure, an und er arbeitete überdies im Ausschuß Forschungs- und Technologiepolitik der Unternehmensverbände Berlin und Brandenburg.

Für 1996 mußte auch etwas übrigbleiben, denn seit letztem Jahr vertritt er Deutschland im G7 Environmental-Futures-Forum.

Zu den Hauptforschungsgebieten von Reinhard Hüttl gehören die Umweltwissenschaften – vor allem die Forstwissenschaften. Wie wir sahen, behandelte er im Rahmen von Promotion und Habilitation die Bereiche Boden- und Waldökologie, insbesondere die Kausalanalytik geschädigter Waldökosysteme der Erde. Dabei machte er sich vor allem um die Erforschung ernährungsbedingter Waldschäden verdient.

Zu den genannten Themen legte er eine Vielzahl meist englischsprachiger Veröffentlichungen vor. Außerdem ist er Herausgeber und Mitherausgeber der *Angewandten Botanik* (seit 1993), der Reihe *Water, Air and Soil Pollution* (seit 1986) sowie des *Forums der Forschung*, des Wissenschaftsmagazins der Universität Cottbus (seit 1994).

In den aktuellen Vorhaben zur Rekultivierung von Boden und Luft in den neuen Bundesländern finden Hüttls Forschungen ein wichtiges Anwendungsfeld vor allem im Hinblick auf die Strukturerneuerung. Seit 1994 ist er Stellvertretender Koordinator des BMFT-Verbundvorhabens SANA (= Sanierung der Atmosphäre über den neuen Bundesländern – was nicht metaphorisch gemeint ist), und er ist

Sprecher des auf Rekultivierung zielenden interdisziplinären Innovationskollegs „Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Lausitzer Braunkohlerevier“, das sich besonders auch um die Bereitstellung der wissenschaftlichen Grundlagen zur Erforschung neugestalteter Ökosysteme bemüht.

Wie viele von uns aus dem Fernsehen wissen, wurde in der Lausitz nach der Auskohlung der Tagebaue eine Vielzahl von Flächen, auch Wälder, von Menschenhand völlig neu geschaffen – hier ist Eichendorffs Frage „*Wer hat dich ...*“ also beantwortet. Es entstanden Landschaftselemente mit neuem Biotopcharakter, in denen z. B. gefährdete Tier- und Pflanzenarten vorkommen, deren besondere Ansprüche gerade durch die Kippen und Halden des Braunkohlebergbaus erfüllt werden.

Die Forstwissenschaft ist eigentlich eine alte Wissenschaft, deren Anfänge bis ins 18. Jahrhundert zurückreichen. Sie erlangte allerdings in den vergangenen beiden Jahrzehnten mit der Erforschung der „neuartigen Waldschäden“ eine besondere Bedeutung und ein neues Gewicht. Der Wald, aus dem die Riesen, die Zauberer und Wichtelmännchen kommen und in dem die Feen tanzen, hat sich als Artefakt zu einem Ort des Sterbens gewandelt. Mit dem „Waldsterben“ verband sich schließlich der „saure Regen“ – der sich für viele zum „sauren Alptraum“, zur Öko-Katastrophe verdichtete und nicht wenig zu einem politischen Bewußtseinswandel einschließlich der Entstehung neuer Parteien, beitrug.

In den 80er Jahren schien der Wald in höchster Gefahr und eine Art Endzeitstimmung („*erst stirbt der Wald – dann stirbt der Mensch!*“ – wie eine der Propherzeiungen dieser Zeit lautete) hatte weite Teile der deutschen Öffentlichkeit erfaßt.

Jetzt, nachdem wir es uns im Grauen einigermaßen behaglich gemacht haben, kommt Herr Hüttl und stellt die Frage, ob das Waldsterben Realität oder Phantom ist. Dem Nichtfachmann muß diese Frage nachgerade ketzerisch erscheinen. Ist das Waldsterben keine Realität mehr, die es doch einmal war? Oder war es immer nur ein Phantom, das wir uns selbst als Realität eingeredet haben? Müssen wir die Suppe nicht auslöffeln, weil wir sie uns nicht eingebrockt haben, oder hat sie schon jemand für uns verzehrt?

Interessante Fragen! Wir dürfen auf die Antworten Reinhard Hüttls gespannt sein.

Reinhard Hüttl

Neuartige Waldschäden

(Akademievorlesung am 17. April 1997)

Inhaltsverzeichnis

Zum Begriff	131
Kritik an den Waldschadenserhebungen.	135
Schadsymptome	138
Zum Ernährungszustand von Wäldern	140
Ernährungsstörungen und „neuartige Waldschäden“	141
Waldschäden aufgrund direkter Immissionseinwirkungen aus ernährungskundlicher Sicht	150
Mg-Mangel in Wäldern ohne Immissionseinfluß	159
Hypothesen zur Erklärung der Ernährungsstörungen	164
Revitalisierung/Restabilisierung geschädigter Waldökosysteme	184
Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	192
Literatur	197

Zum Begriff

Die seit längerer Zeit andauernde Beeinflussung der Umwelt durch anthropogene Stoffeinträge hat Probleme von großer Komplexität verursacht. Die Atmosphäre, Pedosphäre und Hydrosphäre sind lokal, regional und gelegentlich überregional durch eine Vielzahl potentiell toxischer Stoffe verändert, die einzeln oder in additiver bzw. synergistischer Kombination negative Auswirkungen auf die Ökosysteme haben. Daneben gibt es Stoffdepositionen mit positiver Wirkung, die verschiedenen Negativeinflüssen entgegenwirken können.

Obwohl gerade in den letzten beiden Jahrzehnten das Interesse an den Wirkungen von Luftschadstoffen groß war und ist, wurde schon seit langem Besorgnis über die Schädigung der Bäume und Wälder durch Luftschadstoffe geäußert. Allerdings

standen früher lokale Rauchschäden im Vordergrund, die direkt von Nahemittenten verursacht wurden (vgl. Wentzel 1959). Die wesentlichen Luftschadstoffe waren zu dieser Zeit Schwefeldioxid und Stäube. Mit zunehmender Industrialisierung stieg die Verbrennung fossiler Stoffe an. Dieser Umstand sowie die weiträumige Verteilung von luftgetragenen Schadstoffen als Folge der „Hoch-Schornstein-Politik“ haben dazu geführt, daß die Beeinflussung der Wälder durch Luftschadstoffe zunahm. Die in diesem Kontext beobachteten Waldschäden werden als „neuartige Waldschäden“ bezeichnet.

Unter dem Begriff „neuartige Waldschäden“ versteht man eine Reihe von Schadensmerkmalen, die bei verschiedenen Baumarten auf den unterschiedlichsten Standorten seit Mitte der 70er, vermehrt aber seit Beginn der 80er Jahre beobachtet werden, sich meist rasch ausbreiten und großflächig auftreten. Weithin werden diese Waldschäden mit den negativen Wirkungen von Luftschadstoffen in kausalen Zusammenhang gebracht (FBW 1986).

Der Gesundheitszustand von Waldbäumen und -beständen wird von einer Vielzahl von Standortfaktoren bestimmt. Dazu zählen der chemische, physikalische und biologische Bodenzustand, die Wasserversorgung, das Klima, Witterungsbedingungen, nutzungsgeschichtliche Faktoren sowie Immissionseinflüsse. Die Nährelementversorgung stellt dabei ein zentrales Beurteilungskriterium dar. Gut ernährte Bäume sind gegen von außen auf das Ökosystem Wald einwirkende Stressoren widerstandsfähiger als weniger vitale Bäume. Dies gilt für biotische und abiotische Einflüsse gleichermaßen.

Die Untersuchung der „neuartigen Waldschäden“ war deshalb von Anfang an auf die möglichst exakte Erfassung des Gesundheitszustandes erkrankter Bäume gerichtet. Bei Betrachtung des gesamten Waldökosystems ist unter Gesundheit (= Vitalität) die nachhaltige Fähigkeit zu verstehen, negativen Umwelteinwirkungen zu widerstehen und trotzdem stabil und produktiv zu bleiben (Liljelund und Nihlgard 1988). Ein guter Ernährungszustand ist somit eine notwendige Voraussetzung für einen guten Gesundheitszustand. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß bei den großflächig auftretenden „neuartigen Waldschäden“ schon bald Belege für akute Ernährungsstörungen gefunden wurden. Von besonderer Bedeutung ist dabei das phloemmobile Nährion Mg. Aber auch die Elemente K, Ca, P, Zn und Mn spielen gelegentlich eine wichtige Rolle. Aufgrund der Immissionsbelastungen sind zudem die Nährelemente N und S von Interesse (vgl. Zöttl 1989, Hüttl 1988, Kaupenjohann und Zech 1989, Hüttl und Schaaf 1997).

In der Bundesrepublik Deutschland werden die neuartigen Waldschäden seit Mitte der 70er Jahre beobachtet. Dem „Tannensterben“ (*Abies alba*) im Bayerischen Wald sowie im Schwarzwald folgten schon bald Schäden bei Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*). Seit 1983 traten verstärkt Schäden in Buchenbeständen (*Fagus sylvatica*) auf. Seit Anfang der 90er Jahre wurde zudem von einem

neuen Eichensterben (*Quercus* spp.) berichtet (z. B. Hartmann et al. 1989). Erste stichprobenartige Erhebungen in den Jahren 1982 und 1983 zeigten eine rasche Zunahme der Schäden. 1984 wurden erstmalig in allen westlichen Bundesländern Waldschadensinventuren auf statistisch repräsentativer und vergleichbarer Basis durchgeführt. Zur Bestimmung der Schadanteile werden sogenannte Nadel- bzw. Blattverluste und Verfärbungssymptome als maßgebliche Kriterien herangezogen (Tab. 1). Die Erhebung von 1984 zeigte, daß rund 50 % der deutschen Waldfläche leichte bis starke Schäden aufwies. Auch die Ergebnisse aller weiteren Inventuren erbrachten Gesamtschäden von etwa dieser Größenordnung, ohne einen Trend auszuweisen.

Schadklasse*	Nadel-/Blattverlust (%)	Schadgrad
0	≤ 10	–
1	11 – 25**	leicht
2	26 – 60	mittel
3	60 – 99	stark
4	> 99	abgestorben

* Verfärbungen können die Schadklasse erhöhen

** Verluste ≤ 25 % sind seit 1989 als Vorwarnstufe klassifiziert (aus BMELF 1989)

Waldschäden von 1984–1997 in den westlichen Bundesländern

Land	Anteil der Waldfläche mit deutlichen Schäden (Schadstufe 2-4) [in %]													
	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Bremen	–	21	42	25	13	20	5	13	10	13	15	12	13	8
Hamburg	11	26	30	24	15	14	16	17	17	14	15	15	15	16
Niedersachsen	9	10	11	8	10	13	17	10	13	16	17	17	15	16
Nordrhein-Westfalen	11	10	11	16	10	10	13	11	16	16	15	14	–	20
Schleswig-Holstein	12	10	13	23	18	18	15	15	13	16	18	20	27	20
Nordwestdeutschland	10	10	11	13	11	12	15	11	14	16	16	16	–	17
Baden-Württemberg	24	27	23	21	17	20	19 ¹⁾	17	24 ¹⁾	31 ¹⁾	26	27 ¹⁾	35 ¹⁾	19
Bayern	26	28	26	21	18	18	–	30	32	22	30	23	16	19
Hessen	9	12	19	19	17	17	19 ¹⁾	29	33	35	38	40	35	33
Rheinland-Pfalz	8	9	8	9	10	10	10 ¹⁾	12	13	14	21	19	22	24
Saarland	7	10	11	17	19	15	–	17	18	21	18	23	21	19
Süddeutschland	20	22	22	19	17	17	–	24	27	25	29	26	25	22

– Keine Angaben

(aus BMELF 1997)

¹⁾ Ergebnisse aufgrund einer Erhebung im 16 x 16 km-Raster

Tabelle 1
Schadklassen nach prozentualem Anteil von Nadel-/Blattverlusten;
gültig für Zentraleuropa

Betrachtet man die Waldschäden getrennt nach Baumarten, Alter und Schadstufen, dann ergeben sich bei der Entwicklung der Schäden mitunter deutliche Differenzierungen. Noch differenzierter stellt sich das Bild dar, gliedert man die Waldschäden nach den Bundesländern (Tab. 1).

In Tabelle 2 sind mittlere und starke Schäden von Nadel- und Laubbäumen in verschiedenen europäischen Ländern beispielhaft für die Jahre 1986 bis 1988 aufgeführt. Aus diesen vergleichenden Daten lassen sich zwischen 1987 und 1988 mitunter dramatische Veränderungen sowohl zum Positiven als auch zum Negativen erkennen. Ähnlich ungesicherte Entwicklungen mit Bezug auf Baumarten und Regionen werden bis heute beobachtet. Lediglich bei den Kiefernbeständen in Ostdeutschland ist seit einigen Jahren eine klare Verbesserung der Benadelung eingetreten (Hüttl und Schneider 1997).

ECE-Länder	Nadelbäume				Laubbäume			
	Nadel-/Blattverlust Schadstufe 2-4			Veränderungen 1987-88 [in %] ±	Nadel-/Blattverlust Schadstufe 2-4			Veränderungen 1987-88 [in %] ±
	1986	1987	1988		1986	1987	1988	
Österreich	4,5	3,5	3,3	- 0,2	5,5	7,8	8,0	+ 0,2
Belgien (Flandern)	-	4,7	10,8	+ 6,1	-	16,0	10,0	- 6,0
Bulgarien	4,7	3,8	7,6	+ 3,8	4,0	3,1	8,8	+ 5,7
CSSR	16,4	15,6	27,0	+ 11,4	- keine Erhebung 1987			
Dänemark	-	24,0	21,0	- 3,0	-	20,0	14,0	- 6,0
Finnland	-	13,5	17,0	+ 3,5	-	4,7	7,9	+ 3,2
Frankreich	12,5	12,0	9,1	- 2,9	4,8	6,5	5,3	- 1,2
Bundesrepublik Deutschland	19,5	15,9	14,0	- 1,9	16,8	19,2	16,5	- 2,7
Italien (Südtirol)	-	3,1	5,2	+ 2,1	-	3,6	2,9	- 0,7
Liechtenstein	22,0	27,0	23,0	- 4,0	10,0	7,0	5,0	- 2,0
Luxemburg	4,2	3,8	11,1	+ 7,3	5,6	10,1	12,3	+ 2,2
Niederlande	28,9	18,7	16,6	- 2,1	13,2	26,5	29,2	+ 2,7
Spanien	18,2	10,7	7,3	- 3,4	13,7	13,7	6,8	- 6,9
Schweden	11,1	5,6	12,3	+ 6,7	- keine Erhebung 1987			
Schweiz	16,0	14,0	15,0	+ 1,0	8,0	15,0	7,0	- 8,0
Vereinigtes König- reich	-	23,0	20,0	- 3,0	-	20,0	27,0	+ 7,0
Jugoslawien ^{*)}	23,0	16,1	17,5	+ 1,4	-	7,3	9,0	+ 1,7
UdSSR (Litauen)	-	14,8	3,0	- 11,8	- keine Erhebung 1987			

* Erhebung 1988 nur in Teilregionen

(aus BMELF 1989)

Tabelle 2
Waldschadenserhebung der ECE
(Schädigung der Nadel- und Laubbäume; Schadstufen 2-4)

Kritik an den Waldschadenserhebungen

Die in Europa praktizierten Waldschadenserhebungen wurden von Anfang an kontrovers diskutiert (z. B. Rehfuess 1983, Kandler 1985, Hüttl 1985, Innes et al. 1987). Die jeweils im Sommer durchgeführten Inventuren basieren in Deutschland auf einem 4 x 4 km bzw. 8 x 8 km Stichprobenraster. In anderen Ländern liegt meist ein 16 x 16 km Netz zugrunde. An jedem Inventurpunkt wird eine bestimmte Anzahl von Bäumen okular vom Boden aus im Hinblick auf Nadel-/Blattverluste und Nadel-/Blattverfärbungssymptome begutachtet. Da Verfärbungserscheinungen häufig nur auf den Oberseiten der Nadeln/Blätter auftreten, dient zur Beurteilung des Ausmaßes und der Verteilung der Schäden fast ausschließlich das Merkmal Nadel-/Blattverlust.

Bei der Erfassung dieses Parameters geht man von einem „normalen“ Benadelungs-/Belaubungszustand aus. Auf die Problematik der Ermittlung dieses Merkmals bei Fichte hat Schmidt-Vogt (1983) hingewiesen. Zum einen ist die Benadelung der Bäume im „gesunden“ Zustand, also vor einer Schädigung, nicht bekannt. Zum anderen kann auch bei gesunden Fichten kein bestimmtes Höchstalter der Nadeln unterstellt werden. Die Anzahl der lebenden Nadeljahrgänge variiert je nach Standort und genetischer Veranlagung (Burger 1927, Priehäuser 1958). So haben z. B. Hochlagenfichten in der Regel mehr Nadeljahrgänge als Fichten in tieferen Lagen. Hüttl (1985) zeigte, daß die standortspezifische Nährelementversorgung einen Einfluß auf die Benadelungsdichte der Fichte hat. Wachter (1985) wies bei dieser Baumart einen Zusammenhang zwischen Wasserversorgung und Benadelung nach. Mit Hilfe kronenmorphologischer Studien belegten Becker et al. (1989), daß Kronenverlichtungen in Fichtenbeständen auch Ausdruck der sozialen Differenzierung der Bäume sein können. Fink (1988) fand, daß die Fichte ein vorgefertigtes Trenngewebe an der Nadelbasis besitzt, um Nadeln bei Veränderungen des Wassergehaltes abstoßen zu können. Auch stärkere Beschattung, Wind, Schnee, Frost, Hitze, Eis, Insekten und Pilzbefall sowie eine Reihe weiterer Faktoren können Kronenverlichtungen hervorrufen (vgl. Hartmann et al. 1988).

So wurde beispielsweise Anfang der 80er Jahre eine starke Nadelröte bei Fichte in Bayern beobachtet (Rehfuess und Rodenkirchen 1984). Dieses Phänomen, das zu deutlichen Verlichtungen der Kronen führte, wurde als eine Schütteepidemie identifiziert. Auch in Südwest- und in Norddeutschland waren Fichten von dieser Nadelschütte befallen (Zöttl und Hüttl 1985, Wachter 1987). In den Jahren nach der Schütte wurde an diesen Bäumen häufig die Bildung kräftiger Ersatztriebe festgestellt, was Rehfuess (1983b) als eine vitale Regenerationserscheinung interpretierte.

Fast gänzlich außer acht blieb bislang eine mögliche Beteiligung von Wurzelpathogenen bei der Verursachung der Schäden. Allerdings wiesen verschiedene Autoren

bereits sehr früh auf Wurzel- und Stammfäulen in Zusammenhang mit dem raschen Absterben von Fichten auf verschiedenen Standorten Süddeutschlands hin (vgl. Kandler et al. 1987).

Schließlich wurde der Fenstereffekt bei der Fichte von Gruber (1988) als minder schwere Gipfeltrocknis mit fortgesetztem Terminaltriebwachstum diagnostiziert. Als ursächlich dafür wurden Perioden unzureichender Wasserversorgung angesehen.

Aus dieser Diskussion ist unschwer abzuleiten, daß die Benadelung gesunder Koniferen eine erhebliche Schwankungsbreite aufweist (Schröter und Aldinger 1985). Des weiteren werfen verschiedene Fichtenarten (*Picea abies*, *Picea sitchensis*, *Picea rubens*) das ganze Jahr über Nadeln ab, ohne eine Hauptabwurfperiode im Herbst aufzuweisen (Mork 1942, Owen 1954, McKay 1988). Gerade bei Fichte und Kiefer ist der jährliche Streufall sehr unterschiedlich. Schon Ebermeyer (1876) fand in bayerischen Kiefernbeständen während einer siebenjährigen Beobachtungsperiode bis um den Faktor 3 erhöhte jährliche Streufallmengen, und zwar in 36- sowie in 107jährigen Beständen. Das maximale Nadelalter kann bei gesunden Kiefern bis zu sieben Jahre, bei Fichten bis zu 14 Jahre betragen (McKay 1988). Es ist jedoch unbestritten, daß auch Luftschadstoffe zu Blatt- und Nadelverlusten führen können (vgl. Materna 1989). Der Parameter Nadel-/Blattverlust ist somit unspezifisch und zur Bestimmung spezifischer Ursachen völlig ungeeignet (vgl. Hüttl und Schneider 1997).

Hüttl (1985) sowie Gärtner (1985) schlugen anstelle des „Entnadelungsprozentes“ bei Koniferen die Schätzung der aktuellen Benadelung vor. Dieses Vorgehen erscheint akzeptabler, da hierbei die tatsächlich am Baum vorhandene Nadelmasse erhoben wird. Dabei wird das Problem umgangen, von einer fiktiven „Normalzahl“ von Nadeljahrgängen auszugehen, um dann aus der Differenz zu der geschätzten Benadelung den Nadelverlust abzuleiten.

Zusätzlich erhebt sich die Frage, ob der Parameter Nadel-/Blattverlust überhaupt geeignet ist, den Grad der Schädigung von Waldbäumen und -beständen anzugeben. Wenn man davon ausgeht, daß geschädigte Bäume ihr Wachstum reduzieren, dann sollte eine Korrelation zwischen Nadel- bzw. Blattverlusten und Wachstumsparametern gegeben sein. Für die Fichte besteht eine derartige Beziehung nicht immer. Erst bei Nadelverlusten über 40 bis 50 % kann der Volumenzuwachs signifikant reduziert sein (Kenk 1985, Spiecker 1987, Kenk und Spiecker 1988). Bei Fichtenbeständen mit Nadelverlusten unter 50 % waren in Baden-Württemberg häufig überraschende Mehrzuwächse während der letzten zwei Jahrzehnte festzustellen (Spiecker et al. 1996). Franz und Röhle (1985) berichteten von bayerischen Fichtenbestände mit Nadelverlusten von mehr als 60 %, die keine Zuwachsminderungen zeigten. Zu ähnlichen Befunden kam auch Johann (1986) bei der Untersuchung von Fichtenbeständen im bayerischen Alpenraum. Dieser zunächst wider-

sprüchlich erscheinende Befund läßt sich vor allem damit erklären, daß es sich bei den beobachteten Nadelverlusten jeweils um die älteren, mehr oder weniger unproduktiven Assimilationsorgane handelt (Lange et al. 1989). Dieser Zusammenhang steht wiederum im Einklang mit Ergebnissen aus Durchforstungs- und Düngungsversuchen. Beispielsweise untersuchten Binkley und Read (1984) einen 53jährigen Douglasienbestand (*Pseudotsuga menziesii*) in Washington (USA), der vor rund 30 Jahren durchforstet und teilweise mit N gedüngt worden war. Obwohl die Durchforstung zu einer starken Reduzierung der Nadelmasse des Bestandes geführt hatte, war die Holzproduktion pro Nadelflächeneinheit deutlich angestiegen. Die N-Düngung hatte trotz reduzierter Nadelbiomasse zu einer weiteren signifikanten Steigerung des Volumenzuwachses geführt. Schließlich ist von Entastungsversuchen bei Nadelbäumen bekannt, daß die Entnahme von Ästen aus dem unteren, beschatteten Kronenbereich in der Regel keine Zuwachseinbußen verursacht.

Daraus kann gefolgert werden, daß verschiedene Koniferenarten eine über den eigentlichen physiologischen Bedarf hinausgehende Produktion bzw. Retention der Nadelbiomasse betreiben. Es ist deshalb nicht unwahrscheinlich, daß Nadelabwürfe, die unter Streßbedingungen hormonell gesteuert erfolgen, nicht notwendigerweise zu Wachstumsdepressionen führen müssen. Warum gerade die Fichte in der Regel eine so große Nadelmasse behält, obwohl ihr daraus kein Wachstumsvorteil im Vergleich zu anderen Baumarten mit geringer Blattfläche (z. B. Kiefer) erwächst, ist unklar.

Andersson (1986) untersuchte anhand der skandinavischen Waldschadensinventuren den Einfluß verschiedener natürlicher Streßfaktoren auf die Nadelmasse von Koniferen; denn in Schweden wie auch in Norwegen nehmen die Nadelverluste entgegen den Konzentrationsgradienten der relevanten Luftschadstoffe von Süden nach Norden zu. Andersson führte die geringe Benadelung im Norden auf ungünstigere Standortbedingungen, insbesondere das Klima, zurück.

Auch die mitunter beträchtlichen regionalen Schwankungen der Ergebnisse der jährlichen Schadinventuren in Zentraleuropa weisen auf natürliche Faktoren als Auslöser dieser Veränderungen hin. In diesem Zusammenhang darf nicht außer acht bleiben, daß aufgrund von ausgeprägter Trockenheit oder starkem Frost schon früher dramatische Nadelverluste aufgetreten waren (Rebel 1924, Prichäuser 1943). Kandler und Miller (1989) konnten dies sehr anschaulich mit Hilfe von Vergleichsfotografien und kontinuierlichen Beobachtungen demonstrieren (vgl. auch Schweingruber et al. 1988, Schweingruber 1989).

Das Symptom Nadel-/Blattverlust bzw. Kronenverlichtung ist somit weder als neuartig noch als wissenschaftlich brauchbarer Parameter zur Charakterisierung des Vitalitätszustandes der Waldbäume bzw. -bestände anzusehen (vgl. Ellenberg 1996). Auch als Indiz für die negative Einwirkung von Luftschadstoffen ist dieses Kriterium ungeeignet, und zwar schon deshalb, weil abiotische Blatt- und Nadelverluste

bis hin zu flächigen Absterbeerscheinungen auch in Waldgebieten existieren, die nicht durch Luftschadstoffe beeinflusst sind (z. B. Hawaii, Neuseeland; Hüttl und Müller-Dombois 1993; Hüttl und Schaaf 1997).

Schadsymptome

Neben dem unspezifischen Symptom des Nadel- und Blattverlustes wurde eine Reihe weiterer Schadensmerkmale beschrieben und den neuartigen Waldschäden zugeordnet.

Ein häufig als Schadbild der Fichte angesprochenes Phänomen war das sogenannte Lametta-Syndrom. Darunter versteht man das Herabhängen der durch Verlust der älteren Nadeljahrgänge peitschenartig aussehenden Äste zweiter Ordnung (vgl. FBW 1986). Es wurde vermutet, daß das Abweichen der Äste zweiter Ordnung von der als normal betrachteten, mehr oder weniger waagerechten Stellung ein Schadsymptom sei. Andererseits ist hinreichend bekannt, daß eine der genetisch bedingten Fichtenformen, nämlich die Kammfichte, dieses Hängen der Seitenäste zweiter Ordnung auch im gesunden Zustand aufweist (Schmidt-Vogt 1972, 1977). Magel und Ziegler (1987) konnten mit Hilfe von anatomischen Untersuchungen zeigen, daß „Lametta-Fichten“ als Kammfichten mit Nadelverlusten zu betrachten sind und daß das Herabhängen der Seitenzweige zweiter Ordnung kein Schadsymptom ist.

Bei Fichte wie bei Buche und anderen Laubholzarten wurden an den Nadeln bzw. Blättern Kleinstchlorosen bzw. -nekrosen beobachtet, die als sogenannte Ozonflecken interpretiert wurden (Flückiger et al. 1984, Lang und Holdenrieder 1982, Gehrman 1984). Für diese Schäden konnte Fink (1987) bei Fichte Frosteinwirkungen wahrscheinlich machen. An Laubgehölzen hatte Tuboeuf (1916) bereits zu Beginn dieses Jahrhunderts Zwergzykaden als Verursacher identifiziert. Koss (1985) bestätigte diesen Befund. Donaubaer (1988) wies nach, daß auch Milben vergleichbare Schäden setzen.

Als Schadsymptom der Tanne wurde gelegentlich die „Storchennest“-Bildung beschrieben. Auch dabei handelt es sich um ein lange bekanntes Phänomen, das vor allem bei älteren Tannen auftritt. Aber auch bei jüngeren Tannen bleibt bei reduziertem Höhenwachstum vor allem der Terminaltrieb zurück. Gleichzeitig kommt es häufig zu einem verstärkten Wachstum der lateralen Zweige im oberen Kronenbereich. Dadurch entsteht der Eindruck eines Storchennestes (vgl. FWB 1986). Der Tanne ist im Rahmen der neuartigen Waldschäden ohnehin eine Sonderstellung zuzuordnen. Nach anfänglich starken Schäden, die unter dem Begriff „Tannensterben“ zusammengefaßt wurden (Schütt 1977, Wentzel 1980, Schröter 1981, Ulrich 1981, Kramer 1982), erholte sich die Tanne im Gegensatz zu anderen Baumarten

vielerorts rasch. Dies manifestierte sich seit Beginn der 80er Jahre in deutlich verbesserten Zuwachsraten (Kenk 1983, Aldinger 1983, Aldinger und Kremer 1985, Spiecker et al. 1996). Die geographische Verbreitung des Tannensterbens stimmte weitgehend mit dem Gebiet überein, in dem die Tanne kaum eine Provenienzvariation aufweist und durch eine geringe ökologische Amplitude gekennzeichnet ist. Dagegen zeigte die Weißtanne in Gebieten mit größerer genetischer Vielfalt (Kalabrien, Südjugoslawien, Bulgarien) eine überragende Gesundheit und Anpassungsfähigkeit (Larsen 1986). Diese Differenzierung blieb auch dann erhalten, wenn Tannenprovenienzen aus diesen Gebieten untersucht wurden, die durch absterbende Tannenbestände charakterisiert waren. Des Weiteren wurden schon früher Tannensterben beschrieben (z. B. Neger 1908, Wiedemann 1927). Es handelt sich also mit Sicherheit nicht um „neuartige Schäden“.

Bei Buche wurden neben Blattverlusten und -verfärbungen Veränderungen der Kronenmorphologie zur Ansprache der Schädigung empfohlen (Roloff 1985). Als wichtigstes Symptom neuartiger Veränderungen wurde dabei die vorzeitige Abnahme der Wipfeltrieblängen angesehen (Roloff 1988). Diese Reduktion vollzieht sich offenbar derart langsam, daß bei den heute absterbenden Buchen Wachstumsdepressionen mitunter schon seit 30 bis 40 Jahren feststellbar sind, die sich nur zum Teil durch den Alterstrend oder Trockenjahre erklären lassen. Allerdings ist über die Morphologie gesunder Buchenkronen wenig bekannt. Auch variiert die Größe und Form von Buchenblättern stärker als bei den meisten anderen Baumarten (Glavac 1988). Zudem war die Buche verstärkt von Insekten und Blattpilzen befallen, welche die Vitalität der betroffenen Bäume mitunter erheblich beeinträchtigten (FBW 1986). Zudem konnte Abetz (1988) bei der vergleichenden Untersuchung gesunder und verschieden stark geschädigter Altbuchen auf der Schwäbischen Alb keinen Zusammenhang zwischen Schadklasse und dem aktuellen Zuwachsniveau finden. Die geschädigten Buchen waren bei gleicher sozialer Stellung eher durch bessere Zuwächse gekennzeichnet.

Schließlich wurde ein neues Eichensterben beobachtet. Sowohl Trauben- (*Quercus petraea*) als auch Stieleichen (*Quercus robur*) sind von der regional besorgniserregenden Erkrankung betroffen. Das Eichensterben war 1978 zum ersten Mal im Nordosten Ungarns beobachtet worden (vgl. Igmandy 1987). Auf seiner Wanderung hat es 1982/83 österreichische Waldbestände erreicht (vgl. Donaubaauer 1987). Auch in Deutschland und den Niederlanden wurde von zunehmenden Eichenschäden berichtet (z. B. Balder und Lakenberg 1987, Balder 1989, Hartmann et al. 1989, Oosterbaan 1987, Hüttl und Schneider 1997). Neben Veränderungen im Kronenraum treten offensichtlich auch Schäden im Bast- und Splintbereich auf. Gelegentlich kommt es zu spontanen Totalverlusten. Die Erklärung dieser Eichenschäden bewegt sich noch weitgehend im hypothetischen Bereich. Allerdings wurden sowohl in Ungarn und Österreich als auch in Deutschland eine Reihe von Pathoge-

nen, wie Insekten (z. B. Eichenwickler, Frostspanner), Pilze und Nematoden, identifiziert und schon sehr früh mit dem Eichensterben in kausalen Zusammenhang gebracht (Altenkirchen und Hartmann 1987, vgl. Balder und Lakenberg 1987, Kandler 1990, Kandler und Senser 1993, Jung et al. 1996). Zumindest in Norddeutschland wurden die Eichenschäden offensichtlich durch strenge Winterfröste mitverursacht (Hartmann et al. 1989). Im Kronenraum wurden hier neben Blattverlusten, Zweigabsprüngen und Triebsterben auch Vergilbungen festgestellt.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die bislang beschriebenen Symptome der neuartigen Waldschäden seit langem bekannt sind oder mit natürlichen Ursachen erklärt werden können. Diese Schadensmerkmale sind demnach nicht neu. Es gibt jedoch einige Schadsyndrome (= Schadtypen), die neue bzw. neuartige Phänomene darstellen. Diese stehen grundsätzlich im Zusammenhang mit Ernährungsstörungen. Nachfolgend werden daher vorrangig solche Erscheinungen diskutiert.

Zum Ernährungszustand von Wäldern

Viele Waldstandorte, insbesondere in Zentraleuropa, sind nur schwach mit Nähr-elementen ausgestattet. Die ökologische Entwicklungsgeschichte der mitteleuropäischen Wirtschaftswälder ist dadurch gekennzeichnet, daß die „besseren“ Standorte schon frühzeitig nach ihrer Rodung der Landwirtschaft überlassen wurden. Der Forstwirtschaft blieben überwiegend nur Standorte, die landwirtschaftlich nicht genutzt werden konnten. Dies waren Standorte mit schwacher Nährelementversorgung, in geo- und topographisch ungünstiger Lage oder mit extremen Witterungsbedingungen. Vor der modernen, nach ökonomischen und ökologischen Grundsätzen ausgerichteten Bewirtschaftung der Wälder waren vielfältige Devastierungen der Waldstandorte die Regel (vgl. Wittich 1958).

Eingriffe in den Wald sind so alt wie die Menschheit (Markl 1987). In der Urzeit wurden Siedlungen ausschließlich auf fruchtbaren Laubbaumstandorten angelegt. Mit dem Abholzen dieser Bestände war eine relative Erhöhung des Nadelbaumanteils verbunden. Wurden die Siedlungen aufgelassen, waren die Böden meist degradiert, und es erfolgte eine Wiederbestockung mit anspruchslosen Nadelbaumarten. Während des Mittelalters und noch hinein bis ins 20. Jahrhundert führten Waldweide und Streunutzung zu einer weiteren Verarmung vieler Waldstandorte. Die Böden waren häufig in ihrer Fruchtbarkeit so beeinträchtigt, daß für Wiederaufforstungen nur die anspruchslose Fichte oder Kiefer zur Wahl standen. Des weiteren wirkte sich eine Reihe von unregelmäßigen starken Biomasseentzügen (in Deutschland z. B. Reparationshiebe) mit ungenügender Wiederaufforstung negativ auf die Standortgüte aus. Regionale Waldverwüstungen entstanden durch Plaggennutzung, Harzgewinnung, Köhlerei, Aschebrennerei, Glashüttenbetriebe, Kahlschläge für Sa-

linen und Bergbau sowie das Hüttenwesen, Brennholzwerbung für den Hausbrand, Eichenschälwälder für die Lohgerbe und vieles mehr (vgl. Thiel 1988). Die erstmals 1338 in Nürnberg erfolgte Nadelholzsatz begünstigte eine rasche Verbreitung der Fichte, die unabhängig von Mastjahren und der Beschränkung des Anbaus auf reine Waldflächen durchgeführt werden konnte (Hasel 1985). Außer der Anpruchslosigkeit und problemlosen Verjüngung durch Saat war die Ertragsleistung der Fichte beeindruckend. Zudem konnten mit dem Fichtenanbau die Holzmen gen und -sorten erzeugt werden, die der „alte Wald“ nie hätte liefern können (Hasel 1985). Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß die Fichte aber auch die Kiefer heute auf vielen Standorten stockt, die für andere Baumarten wesentlich besser geeignet wären. Bei den geschädigten Fichten- bzw. Kiefernwäldern Deutschlands, wie im Schwarzwald, im Fichtelgebirge, im Harz, im Erzgebirge und in den Küstenregionen, handelt es sich nicht um autochtone Waldbestände, sondern um künstliche Verjüngungen, deren Herkünfte in der Regel unbekannt sind.

Auf die Zusammenhänge zwischen Standortgüte und Ernährungszustand bzw. Wuchsleistung von Waldbäumen haben Wittich und Laatsch, die Begründer der modernen Waldernährungslehre, hingewiesen (vgl. Zöttl 1985). Leyton (1958), Wehrmann (1959), Strebel (1960) und zahlreiche weitere Autoren haben die Beziehungen zwischen der Nährelementversorgung und der Produktivität von Wirtschaftswäldern verdeutlicht. Zur Diagnose mangelhafter, ausreichender und optimaler Nährelementversorgung von Waldbäumen existieren verschiedene Hilfsmittel. Der Blattanalyse und auch der Untersuchung des chemischen Bodenzustandes kommt dabei eine besondere Bedeutung zu (Hüttl 1991). Trotz erfolgversprechender Ansätze kann die Bodenanalyse bislang lediglich Hinweise, nicht aber exakte Aussagen über die aktuelle Nährelementversorgung von Waldbäumen und -beständen liefern. Die Blattanalyse ist hierbei nach wie vor überlegen.

Ernährungsstörungen und „neuartige Waldschäden“

Da die neuartigen Waldschäden häufig auf akuten Ernährungsstörungen, insbesondere Mg-Mangel, beruhen (FBW 1986, Hüttl und Schaaf 1997; Tab. 3), werden nachstehend die relevanten Mg-Mangelaspekte erläutert.

Bei Nadeln von Koniferen setzt die Chlorose an der Nadelspitze an und breitet sich zur Nadelbasis hin aus. Die Vergilbung beginnt bei älteren Nadeln, meist im mittleren bis unteren Kronenbereich der Bäume. Die Verfärbungssymptome treten nur an den Nadeln bzw. Zweigseiten auf, die direkt der Lichteinstrahlung ausgesetzt sind. Nach einer gewissen Zeit, die nicht bestimmbar ist, werden die stark vergilbten Nadeln nekrotisch und fallen ab. Verbessert sich die Mg-Verfügbarkeit, z. B. infolge günstigerer Wasserversorgung, ist auch ein natürliches Wiederergrü-

Schadtyp	Nährelementmangel	Autor
Nadelvergilbung	Mg, Ca, K, Zn	Zech und Popp (1983) Bosch et al. (1983) Zöttl und Mies (1983) Hüttl (1985) Hauhs (1985) Roberts (1989)
Kronenverlichtung	Mg, K, Ca, Zn, P	Kenk et al. (1985) Zech et al. (1985) Aldinger (1987) Hüttl und Fink (1991) Liu und Hüttl (1990)
Nadelröte	(K)	Rehfuess und Rodenkirchen (1984) Zöttl und Hüttl (1985) Liu und Hüttl (1990)
Vergilbung auf Karbo- natstandorten	K, Mn	Hüttl (1985) Rehfuess (1985) Kaupenjohann (1989)
Kronenverlichtung in Küstennähe	Mg, K, P	Reemtsma (1989) Hüttl (1989a)

Tabelle 3

Beziehung zwischen Nährelementversorgung und Schadtypen bei Fichte
(verändert nach Forschungsbeirat Waldschäden/Luftverunreinigung der Bundesregie-
rung und der Länder, 1986; vgl. Hüttl 1991)

nen vergilbter Nadeln möglich (Kandler et al. 1987). Mit Ausnahme der Kiefer sind die jüngsten Triebe von der Gelbspitzigkeit meist nicht betroffen. Bei anhaltendem Mg-Mangel greift die Verfärbung dann auf den nächsten noch grünen Jahrgang über, wenn die neuen Triebe im Frühjahr gebildet werden (Mies und Zöttl 1985, Lange et al. 1987, Slovik 1997). Dies hängt offensichtlich mit der Translokation der relativ mobilen Mg-Ionen aus älterem in jüngeres Gewebe zusammen. Das Höhenwachstum mäßig vergilbter Fichten scheint nicht reduziert zu sein. Analysen des Dickenwachstums zeigen für vergilbte Fichten im Vergleich zu symptomfreien Bäumen reduzierte Zuwachsraten (z. B. Evers 1984). Die stärksten Nadelverluste zeigen sich häufig im mittleren Kronenbereich und führen zum Bild des „sub-top-dying“. Schließlich können die Bäume absterben. Dies geschieht häufig im Zusammenwirken mit Frost, Trockenheit, Schädlings- oder Nadelpilzbefall. Mg-Mangel ist bei jungen wie bei alten Nadelbäumen gleichermaßen anzutreffen. Bei verschiedenen Laubbäumen wie Buche und Eiche finden sich an den älteren Blättern zunächst fleckige gelbliche Interkostalchlorosen, die rasch zusammen-

fließen und sich keilförmig zwischen den Hauptadern zum Stielansatz hin verschieben. Im weiteren Verlauf können braune Nekrosen auftreten. Auch noch nicht vertrocknete Mangelblätter können abgestoßen werden, so daß es zum vorzeitigen Verlust der älteren Blätter kommt. Die jüngeren Blätter bleiben zunächst grün.

Wie bereits oben ausgeführt, sind die als neuartig bezeichneten Waldschäden mehr oder weniger häufig mit Ernährungsstörungen verbunden. Allerdings werden diese Schadensmerkmale heute gelegentlich auf Standorten und in Altersklassen angetroffen, für die sie bislang nicht beschrieben worden sind. Der neuartige Charakter verschiedener dieser Schadtypen wurde mit Hilfe historischer Nadelanalysevergleiche eindrucksvoll demonstriert (Hüttl 1985). Des weiteren wurde die Abhängigkeit der Schäden vom jeweiligen Nährelementangebot und anderen Standort- bzw. bestandsspezifischen Faktoren in vielen Untersuchungen belegt.

Mg-Mangel

Dieser Schadtyp wurde bereits vielfach diskutiert (vgl. Hüttl 1991). Nachstehend werden deshalb vornehmlich solche Aspekte beleuchtet, welche die bemerkenswerten Standortabhängigkeit dieser Erkrankung illustrieren, neue Erkenntnisse bzw. Zusammenhänge aufzeigen sowie die zeitliche Entwicklung und räumliche Verbreitung dieses Syndroms dokumentieren. Im Vordergrund steht dabei die Fichte, die von dieser Erkrankung am augenfälligsten betroffen war bzw. teilweise noch ist.

Ernährungszustand gesund erscheinender und gelbspitziger Fichten

Beispielhaft ist in Tabelle 4 der Ernährungszustand einiger süddeutscher Fichtenbestände des Mg-Mangelschadtyps dargestellt. Da Mg-Mangel im Bestand immer heterogen auftritt, kann in der Regel zwischen gesund erscheinenden und gelbspitzigen Individuen unterschieden werden. Offensichtlich stimmen die okular vorgenommenen Differenzierungen gut mit den nadelanalytischen Ergebnissen überein. Die Schädigung der Bäume ist primär auf den akuten Mg-Mangel zurückzuführen. Ähnlich wie die Mg- sind auch die Ca-Gehalte verschieden, ohne daß bei den kranken Fichten Anzeichen für Ca-Mangel beobachtet wurden. Mit stärkerer Gelbspitzigkeit nehmen zudem die Zn-Spiegel ab. Die N-Versorgung ist zumindest ausreichend. Die N:Mg-Werte der geschädigten Bäume liegen meist deutlich über dem Grenzwert von 30, bei dessen Überschreitung und ausreichender N-Ernährung mit sichtbaren Mg-Mangelsymptomen zu rechnen ist. Unerwartet hoch sind die P-

Standort/Bestand	Gesundheitszustand	N mg/g	P mg/g	K mg/g	Ca mg/g	Mg mg/g	Mn mg/g	Zn mg/g	Al mg/g	N:Mg
Staufen, Schwarzwald; Granit, saure Braunerde; 620 m ü. NN; 10jährig	g	14,0	2,8	11,6	1,8	0,5	420	17	85	28
	k	14,0	2,1	9,0	1,5	0,3	510	11	105	47
	kk	12,6	2,5	9,1	1,3	0,2	370	9	100	63
Elzach, Schwarzwald Granit, saure Braunerde; 900 m ü. NN; 12jährig	g	18,1	3,2	8,8	3,8	0,7	660	26	95	26
	k	15,9	2,3	7,9	3,1	0,4	1.020	18	80	40
Forbach, Schwarzwald; mittl. Buntsandst.; Podsol; 810 m ü. NN; 15jährig	g	14,5	2,5	8,8	4,2	0,9	570	40	55	16
	k	14,5	2,3	9,9	2,7	0,5	360	32	60	30
Baden-Baden, Schwarzwald; Granit, saure Braunerde; 600 m ü. NN; 35jährig	k	17,3	2,9	9,1	1,9	0,5	500	25	65	35
	kk	16,0	1,9	10,1	0,9	0,4	450	16	115	40
Luchsplatzl, Bayr. Wald;** Paragneis, pods. Braunerde; 1.200 m ü. NN; 100jährig	g	15,9	2,0	5,4	1,5	0,7	191	20	100	23
	k	15,0	1,6	5,6	0,8	0,3	110	11	80	50
Mangel-Grenzwerte***		13,0	1,1	4,0	1,0	0,7	20	10	—	8-30

* Anzahl der beprobten Bäume; wird nachstehend nur angegeben, wenn $n < 10$

** aus Bosch (1986; Probenahme: Herbst 1983)

*** aus Hüttl (1991)

Tabelle 4

Elementgehalte in 1jährigen Nadeln von gesund erscheinenden (g) und gelbspitzigen (k) bzw. stark gelbspitzigen (kk) Fichten unterschiedlichen Alters ($n=10$)* in Süddeutschland

Gehalte. Die K-Ernährung ist meist optimal. Nur der Fichtenaltbestand am Standort Luchsplatzl weist lediglich ausreichende K-Versorgung auf. Ähnliche Resultate lieferte die vergleichende Untersuchung jüngerer (40j.) und älterer Fichtenbestände (100j.) auf sauren basenarmen Böden im Fichtelgebirge (Kaupenjohann und Zech 1986).

Zeitliche Entwicklung des Mg-Mangels

Bereits 1904 hat Möller auf die durch Mg-Mangel verursachte Gelbspitzigkeit der Kiefer und auf die damit verbundenen Wachstumsstörungen hingewiesen. Im Zusammenhang mit den neuartigen Waldschäden wurde der Mg-Mangeltyp zum ersten Mal ausführlich von Zech und Popp (1983) für jüngere sowie ältere Fichten- und Tannenbestände des Fichtelgebirges auf sauren basenarmen Podsol-Braunerden aus Granit- und Phyllitfließerden beschrieben. Bosch et al. (1983) fanden die gleichen Symptome bei Fichte ebenfalls auf sauren Böden aus basenarmen kristal-

linen Ausgangsgesteinen im Bayerischen Wald und bezeichneten die Schäden als „Fichten-Hochlagenerkrankung“. Zöttl und Mies (1983) wiesen diesen Schadtyp bei Fichte auf sauren Braunerden über Mg- und Ca-armen Graniten und Gneisen im Südschwarzwald nach. Hüttl (1985) stellte in einer umfangreichen Untersuchung vergleichbare Schadensmerkmale bei Fichte jeder Altersstufe im Grundgebirgs- sowie im Buntsandstein-Schwarzwald fest.

Zur zeitlichen Entwicklung der Gelbspitzigkeit bei Fichte liegen unterschiedliche Beobachtungen vor. Es gibt Bestände, deren Mg-Versorgung sich zunächst zunehmend verschlechterte, wie mehrjährige Untersuchungen von Fichtenbeständen im Bayerischen Wald (Kandler et al. 1987) und im Fichtelgebirge (Schulze et al. 1989) belegen. Andererseits konnte gegen Ende der 80er Jahre vielerorts eine Stagnation des Vergilbungsfortschritts festgestellt werden. In vielen Fällen trat sogar ein Wiederergrünen gelbspitziger Fichten ein. Aufgrund der histologischen Regenerationsmöglichkeit chlorotischer Nadeln erscheint diese Beobachtung durchaus plausibel und paßt gut in das bekannte Bild jährweise fluktuierender Elementgehalte in Koniferennadeln, die allem Anschein nach vornehmlich von witterungsbedingten Faktoren gesteuert werden (vgl. Evers 1972; Hüttl und Schaaf 1997).

Der Befund ständig abnehmender Mg-Gehalte wirft die Frage nach der historischen Entwicklung der „neuen“ Gelbspitzigkeit auf. Erste nadelanalytische Ergebnisse, die auf schwache bis mangelhafte Mg-Ernährung hinwiesen, wurden bereits Ende der 60er Jahre von Evers und Hausser (1973) für Fichtenbestände des Buntsandsteingebietes im Nordschwarzwald vorgelegt (Tab. 5). Bei der Interpretation dieser Analysenergebnisse kamen die Autoren zu dem Schluß, daß die unzureichende Mg-Versorgung das Wachstum der Bäume begrenzte. Des weiteren wurde berichtet, daß bereits nadelanalytische Untersuchungen aus dem Jahre 1964 auf Mg-Unterversorgung hindeuteten. Allerdings wurden zu dieser Zeit noch keine ausgeprägten Mg-Mangelsymptome beobachtet. Dies ist bei dem geringen Mg-Gehalt und der eher weiten N:Mg-Relation zunächst überraschend, bestätigt aber den Befund, daß schwache N-Versorgung die Ausbildung von Mg-Mangelsymptomen unterdrücken kann. Wie aus Tabelle 6 hervorgeht, war schon bei den Mg-Gehalten von 1966 bis 1969 eine abnehmende Tendenz unverkennbar. Den gleichen Trend zeigten die Ca-Spiegel, während die N-, P- und K-Gehalte ungerichtet pendelten.

Anfang der 70er Jahre beobachtete Kreutzer (1975) erstmalig im Oberpfälzer Wald sowie im Fichtelgebirge ausgeprägte Mg-Mangelercheinungen bei Fichte. Fast gleichzeitig berichteten Evers (vgl. Zöttl 1985) von Mg-Mangelsymptomen bei Fichte im Nord-, Zöttl et al. (1977) und Ferraz (1985) im Südschwarzwald sowie Reemtsma (1986) im Solling. Verstärkt trat die Erkrankung Anfang der 80er Jahre auf. Im Frühjahr 1982 wurden beispielsweise im Harz gehäuft Mg-Mangelchlorosen festgestellt, die im trockenen und warmen Sommer 1983 deutlich zunahmen

N	P	K	Ca	Mg	N:Mg
12,9	1,1	6,8	3,6	0,43	30

(aus Evers und Hausser 1973)

Tabelle 5

Elementgehalte in 1jährigen Nadeln von jüngeren Fichten der vier Kontrollparzellen des Düngungsversuches DV 41 (Hilpertsberg) im Buntsandstein-Schwarzwald vom Herbst 1968 [in mg g⁻¹_{TS}]

Probenahme	N	P	K	Ca	Mg	N:Mg
1966	12,1	1,15	6,3	4,7	0,50	24
1968	13,8	1,21	7,1	3,3	0,40	35
1969	12,9	1,04	6,6	2,8	0,36	36

(aus Evers und Hausser 1973)

Tabelle 6

Elementgehalte in 1jährigen Nadeln von jüngeren Fichten der Kontrollparzelle 9a des Düngungsversuchs DV 41 (vgl. Tab. 5) [in mg g⁻¹_{TS}]

(Hartmann et al. 1985). Die Vergilbungen waren bei Bäumen aller Altersstufen anzutreffen, jedoch gehäuft in jüngeren und mittelalten Beständen. Die Schäden nahmen in den Mittelgebirgen mit größerer Höhenstufe zu. In verschiedenen Wuchsgebieten des Harzes wurden 1983 in über 50 % der Bestände ausgeprägte Vergilbungen registriert. Eine Infrarotbefliegung im Sommer 1985 untermauerte die Inventurergebnisse von 1983 und wies zum Teil einen erheblichen Schadensfortschritt nach (Stock 1988). Etwa 1988 kam es im Harz zu einem Stillstand und seit Anfang der 90er Jahre sogar zu einer Umkehrung dieser Entwicklung.

*Beziehungen zwischen Boden- und Nadelanalysewerten
bei unzureichender Mg-Versorgung*

Zur Illustration des chemischen Bodenzustandes von Fichtenbeständen mit den Symptomen der Mg-Mangelkrankung sind in Tabelle 7 exemplarisch verschiedene Parameter eines typischen Standortes im Grundgebirgs-Schwarzwald aufgelistet. Neben den austauschbaren Mg- und Ca-Gehalten sind die pH-Werte, die Basensättigung, die effektive Kationenaustauschkapazität sowie die Mg/Al- und Ca/Al-Quotienten offenbar brauchbare Kennwerte, um den Grad der Versauerung und Basenverarmung des Oberbodens zu charakterisieren. Allerdings wiesen Liu

Parameter	Bodentiefe (cm)		Parameter	Bodentiefe	
	0–10	20–30		0–10	20–30
K ⁺ μeq g ⁻¹	2,7	1,2	pH (CaCl ₂)	3,2	3,4
Ca ²⁺ μeq g ⁻¹	0,3	0,4	pH (H ₂ O)	3,8	4,1
Mg ²⁺ μeq g ⁻¹	2,3	1,0	Mg/Al (mol)	0,062	0,028
Mn ²⁺ μeq g ⁻¹	0,3	0,4	Ca/Al (mol)	0,008	0,011
Fe ²⁺ μeq g ⁻¹	2,8	0,6	K/Ca (mol)	18	6
Al ³⁺ μeq g ⁻¹	56,0	53,0	BS %	6,2	3,9
H ⁺ μeq g ⁻¹	21,2	9,9	Ake	85,6	66,5

Tabelle 7

Chemischer Bodenzustand eines typischen Hochlagenstandortes (810 m über NN) im Forstbezirk Baden-Baden/Schwarzwald; saure Braunerde aus Solifluktionsschutt über Granit mit rohhumusartiger Moderauflage vom Frühjahr 1984

(1988) und andere darauf hin, daß es für den hier diskutierten Schadtyp nur bedingt möglich ist, mit Hilfe der Analyse von Feinbodenproben signifikante Beziehungen zwischen dem Nährelementangebot des Solums und dem Ernährungszustand der Bäume herzuleiten.

Die boden- und nadelanalytischen Untersuchungen in Fichtenökosystemen ließen bei der Mg-Versorgung einen Grenzwert für ausreichendes bzw. unzureichendes Angebot im Boden erwarten. Diese Annahme steht mit Befunden von Liu und Trüby (1989) im Einklang, die Mg-Mangel bei Fichte nadelanalytisch immer dann nachweisen konnten, wenn die austauschbaren Mg-Gehalte im mineralischen Oberboden unter 2 μeq g⁻¹ lagen. Wie erwartet, fanden die Autoren zwischen der Vergilbungsintensität der Versuchsbestände und den austauschbaren Mg-Gehalten eine hochsignifikant positive Korrelation (Abb. 1), während sich zu den austauschbaren Al-Bodenwerten keine Beziehung nachweisen ließ (Abb. 2).

Mg-Mangel bei unterschiedlichen Mg-Depositionsraten

In den bereits angesprochenen Waldgebieten mit Symptomen der Fichten-Hochlagenerkrankung liegen die atmogenen Mg-Einträge im Freilandniederschlag häufig unter 1 kg ha⁻¹ a⁻¹ (vgl. Feger 1997) und somit geringer als der jährliche Mg-Bedarf eines normalwüchsigen Fichtenbestandes. Raisch (1983) berechnete die mittlere jährliche Mg-Aufnahme in die oberirdische Biomasse bei Fichtenbeständen im Schwarzwald mit einer Umtriebszeit von 140 Jahren. In Abhängigkeit vom Substrat lag diese bei 0,7 bis 1,3 kg ha⁻¹ a⁻¹ Mg. Für die unterirdische Biomasseproduktion sind rund 40 % der Aufnahme von Stamm und Krone anzunehmen (Ulrich

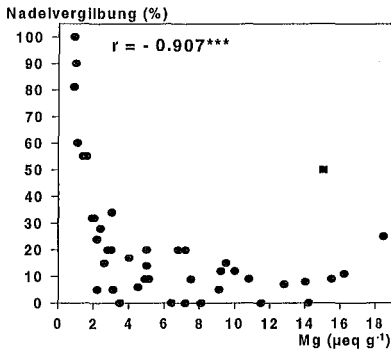


Abb. 1

Austauschbares Mg im mineralischen Oberboden (0-30cm) und Nadelvergilbung bei Fichte in Südwestdeutschland (aus Liu und Trüby 1989; Berechnung ohne ■)

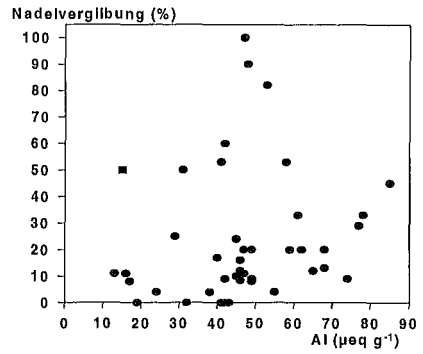


Abb. 2

Austauschbares Al im mineralischen Oberboden (0-30 cm) und Nadelvergilbung bei Fichte in Südwestdeutschland (aus Liu 1988)

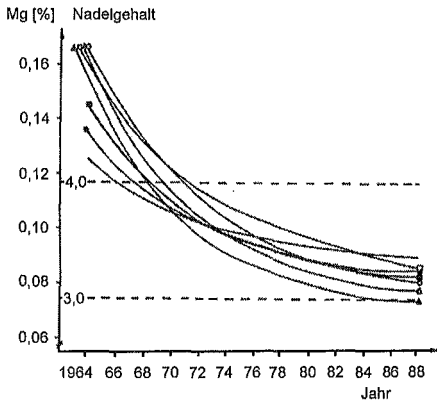


Abb. 3a

Entwicklung der Magnesiumernährung ungedüngter Kiefernbestände. Pleistozäne Sandstandorte, Beobachtungsdauer: 1964-1988 (25 Jahre; aus Hippeli und Banse 1992)

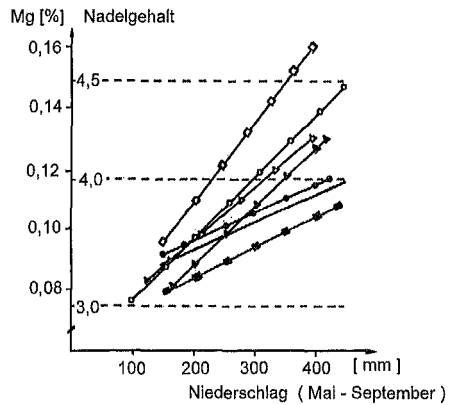


Abb. 3b

Wirkung von Niederschlag auf die Mg-Ernährung ungedüngter Kiefernbestände. Pleistozäne Sandstandorte, Beobachtungsdauer: 1964-1988 (25 Jahre; aus Hippeli und Banse 1992)

et al. 1979). Während Phasen stärkeren Wachstums kann die jährliche Mg-Aufnahmerate von Fichte $2,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ deutlich übersteigen (Ulrich et al. 1979). Je nach Ernteverfahren wird ein größerer oder kleinerer Teil der in der oberirdischen Biomasse akkumulierten Mg-Menge dem Standort entzogen. Dabei ist zu beachten, daß die Mg- (und Ca-) Gehalte im Holz höher sind als die der übrigen Nähr-elemente.

Schon diese wenigen Zahlen indizieren, daß bei Mg-Eintragsraten < 1 (- 2) $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ die Mg-Versorgung der hier diskutierten Bestände allein durch die atmogene Mg-Deposition nicht hinreichend gesichert werden kann. Darüber hinaus wies Zöttl (1987) bei der Berechnung von ökosystemaren Stoffumsätzen typischer Fichtenaltbestände im Südschwarzwald (Bärhalde-Granit) Nettoverluste bei der Mg-Bilanz nach. Andererseits wird deutlich, daß die jährliche Aufnahmerate eine Funktion der Wachstumsrate ist, die wiederum durch verschiedene Faktoren, wie das N-Angebot, beeinflußt werden kann.

Somit ist festzuhalten, daß Mg-Mangel vor allem in solchen Waldbeständen anzutreffen ist, die durch geringe Mg-Einträge (< 1 (- 2) $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) gekennzeichnet sind. Gelegentlich wird Mg-Mangel aber auch bei Fichten- und Buchenbeständen festgestellt, die höhere atmogene Mg-Frachten erhalten. Dagegen ist Mg-Mangel in küstennahen Wäldern aufgrund der relativ hohen meeresbürtigen Mg-Einträge eher unwahrscheinlich. Allerdings ist die Mg-Versorgung dieser Waldökosysteme nicht abschließend geklärt.

Mg-Mangel in tieferen Lagen und außerhalb Deutschlands

Schließlich zeigen die Untersuchungen im norddeutschen Tiefland, daß Mg-Mangel durchaus nicht nur in Hochlagen anzutreffen ist. Mit Hilfe langjähriger Beobachtungen konnte dies für Kiefernbestände auf repräsentativen Standorten in Nordostdeutschland eindrucksvoll nachgewiesen werden (Abb. 3a). In diesem Zusammenhang wurde auch die Abhängigkeit der Mg-Ernährung der Kiefern von der Wasserversorgung während der Vegetationsphase belegt (Abb. 3b). Auch in Süddeutschland, beispielsweise im Schwarzwald, wurde diese Erkrankung örtlich in tieferen Lagen beobachtet (z. B. Evers und Schöpfer 1988, Horras 1986, Ende und Evers 1997).

Nicht nur in der Bundesrepublik Deutschland, sondern auch in anderen Gebieten Zentraleuropas und Nordamerikas wurden unter ähnlichen Standortverhältnissen, insbesondere was den Substratchemismus und das geologische Ausgangsmaterial anbelangt, bei verschiedenen Baumarten akute Mg-Mangelercheinungen beobachtet. Darüber haben Hüttl und Schaaf (1997) ausführlich berichtet.

*Waldschäden aufgrund direkter Immissionseinwirkungen
aus ernährungskundlicher Sicht*

Waldschäden verursacht durch die direkte Einwirkung phytowirksamer Konzentrationen gasförmiger Luftschadstoffe wie SO_2 und O_3 sind seit langer Zeit bekannt (Schröder und Reuss 1883, Nemeč 1957, Wentzel 1958, Miller et al. 1969). Aufgrund regional stark erhöhter NH_3 -Emissionen werden auch direkte NH_3/NH_4 -Schäden diskutiert (van Dijk und Roelofs 1988). Ernährungsstörungen sind in immissionsbeeinflussten Wäldern naturgemäß aber nur dann zu erwarten, wenn die Bäume maximal subletalen Konzentrationen dieser Gase ausgesetzt sind. Hierzu werden nachstehend verschiedene Beispiele vorgestellt. Wirkungsmechanismen, die zu direkten toxischen Schäden an Waldbäumen führen, werden unten erörtert.

SO_2 -Schäden

Die bekanntesten und bedeutsamsten SO_2 -Schäden finden sich in den Hoch- und Kammlagen des Erzgebirges. Das Absterben der Tanne und später auch der Fichte ging in diesem Gebiet mit dem Anstieg der Kohleförderung in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts einher (Materna 1987). In Böhmen und Mähren wurde die SO_2 -Emission seit den ersten Angaben über die Menge der geförderten Kohle bis zum Jahre 1950 auf rund 15 Mio. t geschätzt. Aufgrund der geringen Höhe der Schornsteine und der Geomorphologie dieser Region war eine weite Ausbreitung der Emissionen nicht möglich. Neben der direkten SO_2 -Einwirkung auf die Bäume wurden seit dieser Zeit auch die Böden durch erhöhte S-Einträge, z. B. in Form von Schwefelsäure, belastet. Mit Ausnahme direkter toxischer Schäden sind demnach alle SO_2 -Schäden in Waldökosystemen auf eine Kombinationswirkung aus Bodenbelastung und direkter Schädigung der Bäume (sog. Zangenwirkung) zurückzuführen. So trat z. B. im östlichen Teil des Erzgebirges die erste großflächige Schädigung der Fichte vergleichsweise plötzlich im Frühjahr 1947 auf. Nach Materna (1985) konnte dieses Phänomen keinesfalls als unmittelbare Reaktion auf einen Immissionseinfluß betrachtet werden, da es während der vorangegangenen Jahre zu keinem Anstieg, eher schon zu einer Reduktion der SO_2 -Emission gekommen war. Nach vielen Jahren indirekter Belastung war bedingt durch einen oder mehrere auslösende Stressoren die Schädigung der Fichtenwälder aus der latenten Phase in eine sichtbare überführt worden. Dieselbe Entwicklung wurde im Isergebirge, im Riesengebirge und teilweise in den Beskiden beobachtet. Zudem starben die Fichten zunächst nicht in den Tal- und Hanglagen mit den höchsten SO_2 -Immissionen ab, sondern in den Hoch- und Kammlagen der Mittelgebirge mit geringeren atmogenen SO_2 -Gehalten. Wesentlich ist somit, daß die Fichtenschäden

auf diesen Standorten nicht durch phytotoxische SO_2 -Konzentrationen, sondern durch andere Faktoren ausgelöst wurden und werden. Allem Anschein nach sind dies ökologisch relevante Stressoren, deren Wirkungsgrad mit der Höhenlage zunimmt. Dazu zählen z. B. die Niederschläge, Windstärken, Temperaturextreme, Boden- und Luftfeuchtigkeiten sowie das Nährelementangebot der Böden. Die Abhängigkeit der SO_2 -Wirksamkeit von ökologischen Parametern ist vor allem bei der Fichte erkennbar. Die Reaktion der Kiefer wird dadurch weit weniger modifiziert. Lediglich das pedogene Nährelementangebot spielt auch bei dieser Baumart eine maßgebliche Rolle (Materna 1987).

Um den direkten Einfluß subletaler SO_2 -Gehalte auf den Ernährungszustand von Waldbäumen zu untersuchen, können grundsätzlich zwei Wege gewählt werden. Zum einen kann man Bäume bestimmten SO_2 -Konzentrationen unter kontrollierten Bedingungen aussetzen. Zum anderen ist es möglich, vergleichende Analysen von Elementgehalten der Nadel/Blätter geschädigter sowie ungeschädigter Bäume in Waldbeständen mit erhöhter SO_2 -Belastung vorzunehmen. Was den ersten Ansatz betrifft, so wurden zu Fichte und anderen Baumarten vielzählige SO_2 -Begasungsversuche durchgeführt. Die Ergebnisse sind beinahe so vielschichtig wie die Zahl der Experimente. Allerdings liegen nur wenige Versuche zur Prüfung ernährungsphysiologischer Fragen vor. Jurat et al. (1986) setzten dreijährige Fichten in Bodensubstraten mit unterschiedlicher Ca- und Mg-Sättigung sowie Bodenreaktion sieben Wochen lang einer hohen SO_2 -Dauerbelastung ($140 \mu\text{g m}^{-3}$) aus. Dabei traten nur bei den Pflanzen in den sauren basenarmen Substraten deutliche Störungen der Mg- und Ca-Versorgung auf. Während die Mg- und Ca-Gehalte der Wurzeln abnahmen, stiegen sie in den Nadeln an. Eine 60tägige kontinuierliche, aber schwächer dosierte SO_2 -Begasung ($90 \mu\text{g m}^{-3}$) von Fichtensämlingen in Nährlösung lieferte ähnliche Resultate (Jurat und Schaub 1988). Die 12monatige Begasung junger Fichten mit einer relativ geringen SO_2 -Dosis führte zu einer signifikanten Erhöhung der S-, Ca-, K- und P-Spiegelwerte (Materna 1975). Diese experimentellen Befunde stehen größtenteils in Einklang mit Nadelanalyseergebnissen von SO_2 -beeinflussten Fichtenjungbeständen des Erzgebirges (Materna 1985). Mit Blick auf die neuartigen Waldschäden schließen derartige Befunde aber eine direkte SO_2 -Wirkung als Primärursache der weithin festgestellten Ernährungsstörungen aus; denn hier sind in Abhängigkeit vom jeweiligen Standort beispielsweise die Mg-, Ca- bzw. K-Spiegelwerte geschädigter Bäume im Vergleich zu gesund erscheinenden Individuen reduziert und nicht erhöht (vgl. Slovik 1997).

In den 80er Jahren wurden auch in Tschechien vor allem bei Fichte vermehrt spezifische Verfärbungssymptome und vorzeitige Nadelverluste beobachtet, die auf akute Ernährungsstörungen hindeuteten (Materna 1989). Diese Schäden unterschieden sich deutlich von den gut bekannten SO_2 -induzierten Schädigungen wie Nekrosen und rasches Absterben der Nadeln. Nach Materna entwickelten sich diese Schad-

typen sehr rasch und wurden vorzugsweise in Gebieten mit geringerer Schadstoffbelastung beobachtet. Nadel- und bodenanalytische Untersuchungen dieser Bestände ergaben Mg- bzw. K-Mangel sowie häufig schwache Ca-Versorgung. Ähnliche Befunde liegen bei vergleichbaren Immissions- und Standortbedingungen aus der ehemaligen DDR vor (z. B. Thüringer Wald; Heinsdorf et al. 1988).

Mit Hilfe mikroskopischer Nadelanalysen von Fichtenbeständen der polnischen Beskiden sowie des Isergebirges stellten Kowalkowski et al. (1988) jeweils anatomische Schäden wie Erosionen, Einstürze und Verkrustungen der Wachsschicht im Bereich der Stomata fest, die für SO_2 -Schäden typisch sind. In beiden Gebieten ist also mit direkter SO_2 -Einwirkung zu rechnen. Diese Autoren konnten weiter zeigen, daß die Fichten auf den sauren basenarmen Böden des Isergebirges durch Vergilbungen und Nadelverluste gekennzeichnet waren, während, offenbar aufgrund der guten Nährelementversorgung von auf nährstoffreicheren Beskidenböden stockenden Beständen, makroskopische Schäden fehlten. Die insgesamt eher geringen Fichtenschäden in den Beskiden im Vergleich zum Isergebirge indizieren, daß die Nährelementversorgung bei subletalen SO_2 -Konzentrationen einen prädisponierenden Faktor für die Entwicklung spezifischer Waldschäden darstellt. Dabei sind gut ernährte Bestände gegen derartige Einflüsse offensichtlich deutlich widerstandsfähiger. Zu sehr ähnlichen Aussagen kamen Hüttl und Zachar (1990), die Fichtenbestände in den tschechischen Beskiden bei ebenfalls erhöhter SO_2 -Belastung untersuchten.

SO_2 -verursachte Waldschäden wurden auch aus China berichtet (Ma 1988). In den höheren Lagen des Wushan-Gebirges im Osten der Provinz Sichuan sind zahlreiche Koniferenwälder erheblich geschädigt. Die betroffenen Baumarten sind *Pinus armandii*, *Pinus massoniana* und *Abies fabri*, die etwa zwischen 1.300 und 2.000 m über NN auf sauren Böden aus basenarmen Ausgangsgesteinen wachsen und zum Teil flächig ausgefallen sind. Die mittleren SO_2 -Konzentrationen schwanken in diesem Gebiet zwischen 90 und $350 \mu\text{g m}^{-3}$. Die SO_2 -Höchstwerte können $2.870 \mu\text{g m}^{-3}$ erreichen. Ähnlich wie in den am stärksten belasteten Teilen des Erzgebirges starben die Bestände in Sichuan vor allem in unmittelbarer Umgebung der Emittenten sowie in den Hoch- und Kammlagen der benachbarten Bergketten ab. Die Symptome sind in beiden Regionen identisch. Die nadelanalytische Untersuchung geschädigter Kiefern in den chinesischen Hauptschadensgebieten zeigte in der Regel deutlich erhöhte S-Gehalte. Dies traf auch für die Al-, Fe-, Mg- und teilweise für die Ca-Spiegel zu, was auf zusätzliche Staubeinflüsse schließen läßt (vgl. Galloway et al. 1987, Hüttl et al. 1996). Dagegen waren die K- und Mn-Gehalte mit den Schädigungen negativ korreliert (Ma 1988). In den etwas entfernten Koniferenwäldern werden seit kurzem Nadelverfärbungen beobachtet, die akute Ernährungsstörungen vermuten lassen (Ma, mündl. Mittl.).

Somit belegen auch die chinesischen Untersuchungen das in Waldökosystemen hinreichend bekannte Phänomen konzentrationsabhängiger Schädigungsintensitäten entlang von SO_2 -Gradienten, die von direkten letalen über direkte subletale bis hin zu indirekten Wirkungen reichen und jeweils verschiedene mikro- und/oder makroskopische Symptome an den davon betroffenen Waldbäumen hervorrufen. Mit Ausnahme von toxischen SO_2 -Belastungssituationen spielt dabei die jeweilige Nährelementversorgung der Wälder eine entscheidende Rolle.

O₃-Schäden

Das Waldschadensproblem in den Wäldern der San Bernardino Mountains östlich von Los Angeles war bereits in den frühen 50er Jahren entdeckt worden (Miller und Millecan 1971; vgl. Miller 1989). An den älteren Nadeln verschiedener Koniferenarten wurden ungeordnete chlorotische Flecken und Bänderungen festgestellt. Diese Schäden traten an den Nadelober- und -unterseiten gleichermaßen auf. Die Symptomentwicklung begann in der Regel im unteren bis mittleren inneren Kronenbereich und setzte sich nach oben und außen fort. Die Vegetationsperioden 1946 bis 1960 waren überdurchschnittlich trocken. Während dieser Trockenjahre traten die Schäden verstärkt auf. In der Zeit danach fielen ausreichend Niederschläge. In dieser Periode setzte sich der Vitalitätsverlust der symptomatischen Bäume mehr oder weniger deutlich fort, während die gesunden Bäume auf die besseren Witterungsbedingungen positiv reagierten (Miller 1989). Da die an den Waldbäumen beobachteten Symptome teilweise denen ähnelten, die an landwirtschaftlichen Kulturen sowie an Zierpflanzen und -gehölzen in tieferen Lagen um Los Angeles aufgrund von O_3 -Einfluß existierten, lag die Vermutung nahe, es könnte sich auch bei den Waldschäden in den San Bernardino Mountains um O_3 -Einwirkung handeln. Um diese Annahme zu prüfen, wurden Zweige gesunder Bäume in Kammern mit O_3 begast. Als sich rasch die gleichen Symptome einstellten, wie sie an den geschädigten Bäumen vorlagen, war O_3 als Schadensursache erkannt. Im folgenden wurden vor allem die physiologischen, ertragskundlichen und pflanzenphysiologischen Auswirkungen unterschiedlicher O_3 -Belastungen untersucht. In den San Bernardino Mountains waren und sind derartige Untersuchungen aufgrund eines O_3 -Konzentrationsgradienten unter Freilandbedingungen möglich. Von dem Ort größter Schädigung in einer Höhe von rund 1.700 m über NN mit durchschnittlichen Sommer- O_3 -Konzentrationen von etwa 200 bis 240 $\mu\text{g m}^{-3}$ fallen die O_3 -Gehalte innerhalb von rund 50 km nach Osten hin um etwa die Hälfte auf rund 100 bis 120 $\mu\text{g m}^{-3}$ ab. Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, daß *Pinus ponderosa* die am stärksten geschädigte Baumart ist. Bei Beständen im Westen des Schadgebietes waren die Symptome wesentlich stärker ausgeprägt als im Osten. Selbst

im Gebiet der größten Schäden gab und gibt es deutliche Differenzierungen bei den dort natürlich vorkommenden Baumarten. So ist *Pinus ponderosa* immer deutlich stärker geschädigt als z. B. *Abies concolor*. Mäßige Symptome treten an *Pinus colteri*, *P. Jeffreyi* und *P. lambertiana* auf. Auch Laubbäume wie *Quercus kelloggii* zeigen Schadsymptome, die sich in Aufhellungen zwischen den Blattadern und vorzeitiger Seneszenz äußern. Interessant ist die jahreszeitliche Entwicklung der Schäden an den Nadelbäumen. Beginnend jeweils ab etwa Mitte Juni treten die ersten Schäden an älteren Nadeln auf, die sich bis in den Herbst hinein im Sinne einer Akkumulation phytowirksamer O₃-Einwirkung deutlich verstärken. Die älteren Nadeln sind dann deutlich gelb. An den jüngsten Trieben treten in der Regel keine Symptome auf. Die Produktion von Antioxidantien dieser Nadeln reicht offensichtlich aus, um die aufgenommenen Oxidantien zu detoxifizieren. Während des Winters fallen dann die stark geschädigten vergilbten Nadeln ab, und im Frühjahr sehen die Wälder zwar etwas verlichtet, aber insgesamt grün und gesund aus, und der Zyklus beginnt von neuem.

Zur Beurteilung der Mortalität O₃-geschädigter Bäume wurden 1973 Beobachtungsflächen eingerichtet, die zehn Jahre später erneut bonitiert wurden. In dieser Zeitspanne waren 33 % der *Ponderosa*-Kiefern in der Altersklasse von 50 bis 99 Jahren auf den am stärksten geschädigten Flächen abgestorben. Im Vergleich dazu waren rund 7 % der Bäume auf den Flächen mit leichten bis mäßigen Schäden ausgefallen. Für *Abies concolor* lagen die Werte bei 20 % bzw. 0 %. Die unmittelbare Todesursache waren verschiedene biotische und abiotische Faktoren, wobei Borkenkäferangriffe und Pilzinfektionen den größten Anteil darstellten. Aufgrund dieser ökologischen Veränderungen wurde vermutet, daß *Calocedrus decurrens*, eine vergleichsweise O₃-resistente Art, die dominierende Baumart in den Hochlagenwäldern der San Bernardino Mountains werden könnte (McBride et al. 1985). Bislang gibt es hierfür allerdings keine hinreichend fundierten Belege.

Reich und Admundson (1985) untersuchten die Photosyntheseleistung von *Pinus ponderosa* unter verschiedenen O₃-Belastungssituationen. Dabei zeigte sich, daß in Abhängigkeit von den jeweils vorherrschenden O₃-Konzentrationen in den Wäldern der San Bernardino Mountains mehr oder weniger starke Zuwachsdpressionen zu erwarten sind. Tingey et al. (1976) konnten weiter zeigen, daß sich die eingeschränkte Assimilatproduktion negativ auf das Wurzelwachstum auswirkt, und zwar noch ehe an den oberirdischen Baumteilen sichtbare Schäden auftreten bzw. das Dickenwachstum merklich verringert ist. Dies trifft offenbar auch für die Mykorrhiza-Frequenz zu (Simmons und Kelly 1989, Pye 1988, Gorisson und van Veen 1988, Krause et al. 1986, Miller et al. 1996).

Die O₃-Hypothese zur Erklärung der neuartigen Waldschäden Zentraleuropas geht davon aus, daß Ozon das Blatt- bzw. Nadelgewebe von Waldbäumen schädigt und in Verbindung mit sauren Niederschlägen erhöhte Mengen mobiler oder austausch-

barer Nährionen wie Mg, K, Ca, Mn und Zn aus den Assimilationsorganen ausgewaschen werden. Neben den oben beschriebenen, auch heute noch mehr oder weniger unverändert vorherrschenden O₃-Belastungen in den San Bernardino Mountains (Miller et al. 1996) sind die Kiefernwälder der Gebirgsketten östlich und nordöstlich von Los Angeles zusätzlich sauren Niederschlägen ausgesetzt. Beispielsweise fanden Waldmann und Hoffmann (1985) 1982 und 1983 pH-Werte zwischen 2,06 und 3,87 im Bestandsniederschlag eines Kiefernwaldes in den Vorbergen der San Gabriel Mountains. Zur Prüfung der O₃-Hypothese erschien es deshalb sinnvoll, geschädigte Nadelbaumbestände in den San Bernardino Mountains auf ihren Ernährungszustand hin zu untersuchen.

Im Spätsommer 1985 wurden vier verschiedenen stark geschädigte *Pinus ponderosa*-Bestände aus dem Dauerbeobachtungsflächennetz des San Bernardino National Forest nadelanalytisch und im Herbst 1988 bodenanalytisch beprobt. Die vier Versuchsflächen sind in Tabelle 8 näher beschrieben. Die durch mediterranes Klima geprägten ungleichaltrigen Mischwälder liegen zwischen 1.580 und 2.040 m über NN und erhalten unterschiedliche Jahresniederschläge. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt rund 8 bis 9°C. Das Ausgangsgestein ist Granit mit trockenen, wenig verbräunten, lehmig sandigen bis grusigen Rohböden.

Standort (Abk.)	Höhe über NN m	mittlerer Jahresnie- derschlag mm	Ausgangs- gestein	Bodentyp (US-Nomen- klatur)	Körnung (%) (in 0-15 cm Bodentiefe)		
					2-0,5 mm	0,5-0,002 mm	<0,002 mm
Sky Forest (SF)	1.705	1.112 (1.086)*	Granitver- witterung	Haplo- xeroll**	71,2	18,5	10,3
University Conference Center (UCC)	1.587 (900)	1.063	Granitver- witterung	Ultic Agri- xeroll***	69,1	24,8	6,1
Camp Angeles (CA)	1.762	750 (1.138)	Granit (Colluvium)	Haploxeroll	79,8****	14,1	6,1
Heart Bar (HB)	2.039	389	Granit (Alluvium)	Haploxeroll	84,8	9,9	5,3

* durchschnittlicher Jahresniederschlag 1974–1978

** wenig verbräunter sandig bis lehmig sandiger Granitgrus-Rohboden, teilweise sehr skelettreich

*** Rohboden mit Tonanreicherung im Unterboden

**** Ca nicht untersucht; Daten von vergleichbarem Nachbarstandort (Schneider Creek)

Tabelle 8

Standortparameter der Versuchsbestände in den San Bernardino Mountains/USA

Standort	Jahr	9-Std.- Mittelwert *		durchschnittlicher Maximalwert	
		$\mu\text{g m}^{-3}$	x	$\mu\text{g m}^{-3}$	x
SF	1974	160		220	
	1975	140	150	210	215
	1976	140		200	
	1978	160		230	
UCC	1975	130	130	190	190
CA	1974	100		140	
	1975	100	110	170	
	1976	100		160	
	1978	130		190	
HB	1976	40	40	70	70

(nach Miller et al., 1986)

* Miller et al. (1986) halten den 9-Std. Mittelwert für einen adäquaten Indikator zur Beurteilung der O_3 -Dosis, der Waldbestände ausgesetzt sind.

Tabelle 9

O_3 -Belastung der Versuchsstandorte jeweils im Juli und August von 1974 bis 1978

Die O_3 -Belastung der Bestände ist differenziert (Tab. 9). Vor allem der Standort Heart Bar ist nur mäßig durch O_3 beeinflusst. Bei den Versuchsbäumen handelt es sich um mittelalte herrschende Kiefern, die in Abhängigkeit der an den Versuchsstandorten vorherrschenden O_3 -Konzentrationen leichte bis starke O_3 -Schäden aufweisen.

Bei der Interpretation der Analysedaten ist zu beachten, daß die langjährigen mittleren Jahresniederschläge mit den durchschnittlichen O_3 -Konzentrationen positiv korreliert sind (Abb. 4). Zudem scheinen die Niederschläge am Standort Camp Angelus während bestimmter Perioden deutlich über dem langjährigen Mittelwert zu liegen, während dies für die von der Küste etwas weiter entfernten Standorte Sky Forest und University Conference Center offensichtlich kaum zutrifft (vgl. Tab. 8). Abgesehen von diesen Einschränkungen sind die Probeflächen standörtlich gut vergleichbar.

Wie aus Abbildung 5 hervorgeht, nehmen die K-Nadelgehalte mit steigender O_3 -Konzentration zu und sind mit den aktuellen austauschbaren Bodenwerten korreliert (Hüttl 1991). Auch die Mg-Nadelwerte nehmen mit steigender O_3 -Konzentration zu (Abb. 5). Die Mg-Ernährung der Bäume ist im Mittel gut bis optimal.

Im Sinne der O_3 -Hypothese überrascht die bessere K- und Mg-Ernährung der stärker geschädigten Kiefern im Vergleich zu den weniger belasteten Bäumen. Sollte es bei den Kiefern, die den größeren O_3 -Einwirkungen ausgesetzt sind, tatsächlich zu einem verstärkten K- und Mg-Leaching kommen, so sind die Bäume offensichtlich in der Lage, diese Verluste durch erhöhte Nährelementaufnahme zu egalisieren.

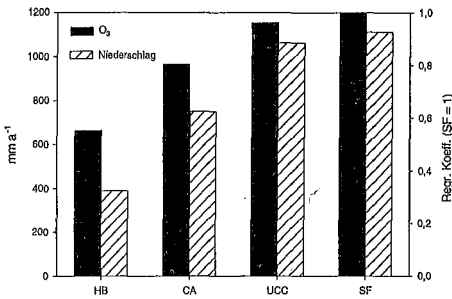


Abb. 4

Zusammenhang zwischen durchschnittlichem Jahresniederschlag und mittlerer O₃-Belastung (Juni bis Oktober 1975; vgl. Tab. 9)

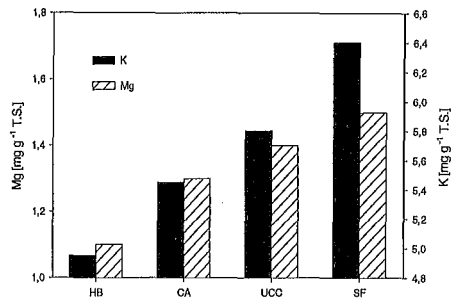


Abb. 5

Mg- und K-Nadelgehalte in Abhängigkeit von der O₃-Belastung (Regression s. Abb. 4)

Nach den Leaching-Versuchen von Mengel et al. (1987) kann es bei hinreichenden Bodengehalten sogar zu einer Überkompensation der Auswaschungsverluste kommen. Andererseits ist bei den stärker geschädigten Bäumen mit höheren Verlusten älterer Nadeln eine intensive Translokation mobiler Nährionen in die jüngsten Triebe anzunehmen.

Mit Bezug auf die Nährelementversorgung der verschieden stark mit O₃ belasteten *Pinus ponderosa*-Hochlagenwälder in den San Bernardino Mountains auf eher trockenen, durchlässigen Granit-Verwitterungsböden ist demnach herauszustellen, daß die mittleren K- und Mg-Spiegel mit der O₃-Belastung positiv korreliert sind. Die Interpretation dieses aus der Sicht der O₃-Hypothese völlig unerwarteten Befundes wird dadurch erschwert, daß mit zunehmenden O₃-Konzentrationen auch die mittleren Jahresniederschläge ansteigen. Somit könnte die bessere K- und Mg-Ernährung dieser Bäume durch die günstigere Wasserversorgung bedingt sein. Dieser Erklärungsansatz kann aber nicht befriedigen, da davon auch die übrigen Nährelemente betroffen sein sollten. Dies ist aber nicht der Fall (Hüttl 1991). Andererseits könnten interne Verlagerungsprozesse infolge starker Kronenverlichtung zur Anreicherung von K und Mg in den jüngsten Trieben führen.

Die Versuchsergebnisse indizieren somit, daß die zur Kausalität der neuartigen Waldschäden in Zentraleuropa formulierte O₃-Hypothese im Sinne einer Primärursache kaum aufrechterhalten werden kann. Dagegen können chronische O₃-Einflüsse als ein mitwirkender Faktor beim Zustandekommen verschiedener Waldschadenstypen nicht ausgeschlossen werden.

NH₃/NH₄-Schäden

Die im Südosten der Niederlande und anderenorts rasch vorangeschrittene Intensivierung der landwirtschaftlichen Tierproduktion war mit einer massiven Zunahme der NH₃-Emissionen verbunden (Döhler und Aldag 1989, Hofmann et al. 1990). Mit Blick auf mögliche Waldschäden sind diese von regionalem Interesse. Aber lediglich lokal kann es zu direkten NH₃/NH₄-Schäden kommen; denn nur Bäume, die direkt hohen Ammoniak-Konzentrationen ausgesetzt sind, nehmen pflanzenwirksame NH₃-Mengen auf. Dadurch können Gewebeschäden bis hin zu Absterbeerscheinungen ausgelöst werden. Toxische NH₃-Effekte wurden bislang hauptsächlich an Nadelbäumen beobachtet. Hohe NH₃-Immissionen wirken sich besonders während der Wintermonate negativ auf die Bäume aus, da bei niedrigen Lufttemperaturen auch die biologische Aktivität der Bäume stark herabgesetzt ist und somit eine ausreichende NH₃-Detoxifizierung nicht möglich ist. Erst wenn die Temperaturen im Frühjahr wieder ansteigen, treten die Symptome – rötlich-braune bis violette Verfärbungen – hervor. Der Charakter der direkten Schädigung wird dadurch unterstrichen, daß die größten Schäden jeweils in unmittelbarer Nähe der Emissionsquelle, und dort vor allem im Bereich der Hauptwindrichtung auftreten. Ein anschauliches Beispiel derartiger Einwirkungen hat Kaupenjohann (1989) für Nadelbaumbestände in der Nähe eines Hühnerstalls beschrieben.

In etwas größerer Entfernung der NH₃-Quelle kommt es infolge chemischer Prozesse in der Atmosphäre zu erhöhter NH₄⁺-Belastung. NH₄⁺- wie auch NH₃-Einfluß kann bei Koniferennadeln eine Schädigung der Wachsschicht hervorrufen (Lekkerkerk und Smeulders 1987). NH₄ kann wie NH₃ direkt von den Nadeln aufgenommen werden, was infolge der geringeren Toxizität von NH₄ zunächst nicht zu anatomischen Schäden, sondern zu verschiedenen physiologischen Störungen führt. So wird z. B. die Chlorophyllsynthese partiell inhibiert, und es treten Chlorosen an den jüngsten Trieben auf. Roelofs et al. (1985) konnten bei *Pinus nigra* var. *maritima* zeigen, daß hohe NH₄-Depositionsraten aufgrund von NH₄-Aufnahme über die Nadeln erhöhte Austauschverluste von K, Mg und Ca zur Folge hatten. Dadurch kann K- und/oder Mg-Mangel induziert werden.

Weitere direkte Schäden resultieren aus überhöhten NH_x-Konzentrationen in der Rhizosphäre. Dies betrifft vor allem die Feinwurzel-Mykorrhiza-Symbiose (Arnolds und Jansen 1987). Besonders in den Nadelbaumbeständen Südost-Hollands, in denen die N-Einträge im Bestandsniederschlag mit überwiegendem NH₄-Anteil gelegentlich sogar mehrere hundert kg ha⁻¹ a⁻¹ N übersteigen, wurde eine merkliche Reduktion der Mykorrhiza-Artenvielfalt in Douglasienbeständen festgestellt. Dieser Befund steht im Einklang mit den Beobachtungen aus N-Düngungsversuchen mit hohen N-Gaben (Björkmann 1942). Wichtig erscheint in diesem Zusammenhang, daß in Gegenwart von NH₄ die Pilzbiomasse zunächst zunimmt, was mit dem Einbau von

NH_4 in das pilzliche Chitin erklärt werden kann (Plassard et al. 1982). Dies stellt offensichtlich eine Schutzstrategie dar, wodurch letztendlich die NH_4 -Aufnahmekapazität der Bäume gemindert wird. Erst bei sehr hohen NH_4 -Konzentrationen in der Bodenlösung kommt es zur Schädigung der Mykorrhiza-Pilze (vgl. Münzenberger et al. 1997). Damit ist in der Regel neben einer qualitativen auch eine quantitative Veränderung der Mykorrhizen verbunden. Außer der direkten Schädigung der Symbionten stellten Boxman et al. (1988) heraus, daß mit steigender NH_4 -Konzentration in der Bodenlösung die Aufnahme von K, Ca und P über die Mykorrhiza-Pilze reduziert bzw. sogar völlig unterbunden sein kann.

Neben direkten NH_3 -Schäden können erhöhte N-Einträge – insbesondere in Form von NH_4 -N – erhebliche Veränderungen im Waldökosystem, gerade was die Nähr-elementversorgung anbelangt, mit sich bringen. Hierüber wird unten berichtet.

Mg-Mangel in Wäldern ohne Immissionseinfluß

Wie oben ausführlich beschrieben, wurde in geschädigten Wäldern Zentraleuropas und Nordamerikas Mg-Mangel weit verbreitet festgestellt und in der Regel im Zusammenhang mit Immissionseinwirkungen diskutiert. Akuter Mg-Mangel kommt aber auch in Waldgebieten ohne nennenswerte Immissionseinflüsse vor, so z. B. bei *Pinus radiata* in verschiedenen Regionen Neuseelands.

Verhoeven et al. (1987) stellten vergleichende Messungen der Ionenkonzentration im Regen und Nebel an je zwei Standorten auf der Südinsel Neuseelands und im Fichtelgebirge an. Während die Belastungssituation im Fichtelgebirge durch hohe H-, NO_3^- , SO_4^- und NH_4^- -Gehalte gekennzeichnet ist, konnten in Neuseeland erhöhte Konzentrationen nur solcher Ionen bestimmt werden, die wie Na, Cl und Mg aus Meeressalzen stammen. Naturgemäß sind diese vornehmlich in Küstennähe anzutreffen. Im Fichtelgebirge ist die H-Konzentration 20- bis 30fach höher als in Neuseeland. Der Regen-pH-Wert pendelt in Neuseeland um 5,6. Im Fichtelgebirge liegt die Nebelacidität ($\text{pH} > 3,1$) erheblich über der im Regen ($\text{pH} > 4,1$), während sich in Neuseeland kein Unterschied im Säuregehalt von Nebel und Regen feststellen läßt. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, daß bei der Verdunstung von Nebel mit pH-Werten unter 4,3 die Säurekonzentration auf einer Nadel rasch zunimmt, während die Acidität von Nebel mit einem pH-Wert um 5,6 bei Verdunstung nur um rund 0,2 pH-Stufen ansteigt (Frevert und Klemm 1984). Somit kann säureinduziertes Leaching aus Koniferennadeln für neuseeländische Bestände ausgeschlossen werden. Hodgkiss (mündl. Mitt.) konnte diese Ergebnisse im Prinzip auch für die Nordinsel Neuseelands verifizieren. Nach seinen vorläufigen Messungen beträgt z. B. der mittlere NO_3^- -Eintrag $0,61 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die durchschnittli-

chen O_3 -Gehalte liegen bei rund $40 \mu\text{g m}^{-3}$. Demnach sind sowohl die Wälder der Nord- als auch der Südinsel Neuseelands frei von anthropogenen Immissionen. Im Inneren der Nordinsel sind die Böden durch eine Reihe von Vulkanausbrüchen geprägt. In dem Gebiet um Lake Taupo im heutigen Kaingaroa Forest kam es vor rund 1.900 Jahren zur bislang letzten Sedimentation eines sauren rhyolitischen Bimssteines. Diese als Taupo-Bimsstein bezeichnete Formation ist im südlichen Teil des Kaingaroa Forest sehr tiefgründig, während sie im Norden meist weniger mächtig und teilweise sehr skelettreich ist. Der darunterliegende grobe, blockige, teilweise geschmolzene Fließ-Tephrit steht gelegentlich oberflächlich an (vgl. Landmann et al. 1997). Klimatisch ist das rund 180.000 ha große Gebiet des Kaingaroa Forest als gemäßigt einzustufen. Die durchschnittlichen Jahresniederschläge betragen rund 2.000 mm und sind durch eine gleichmäßige Jahresverteilung gekennzeichnet.

Im Kaingaroa Forest wurde 1920 damit begonnen, *Pinus radiata* zu pflanzen, und bis 1930 waren rund 100.000 ha bestockt. Mg-Mangelsymptome wurden dort zum ersten Mal in den 60er Jahren im nördlichen Kaingaroa Forest beobachtet (Will 1966). Die leichte Gelbspitzigkeit an zweijährigen und älteren Nadeln trat jedoch nur bei jungen Bäumen auf und war besonders augenfällig nach Astungen. Allerdings gelang es den Bäumen im Laufe der Zeit, das rhyolitische Material zu durchdringen und mit ihren Wurzeln in den älteren, stärker verwitterten Tephrit einzudringen. Aufgrund der hohen pflanzenverfügbaren Mg-Gehalte dieses basaltischen Ergußgesteines verbesserte sich die Mg-Versorgung der Bäume rasch und nachhaltig. Auf diesen Standorten war und ist das Mg-Problem also vom Entwicklungszustand der Bäume abhängig und zeitlich begrenzt. Interessanterweise existieren seit den 30er Jahren vergleichbare Befunde mit Bezug auf die Gelbspitzigkeit von *Pinus sylvestris* im norddeutschen Diluvialgebiet (Becker-Dillingen 1939, Brüning 1959). Auch hier ist die Mg-Mangelsituation zeitlich begrenzt und verschwindet, wenn die Bäume mit ihren Wurzeln einen größeren Teil des Solums erschlossen haben (vgl. Baule und Fricker 1967).

Ab 1970 wurden auch im südlichen Teil des Kaingaroa Forest Wieder- bzw. Erstaufforstungsmaßnahmen mit *Pinus radiata* durchgeführt. Obwohl die Sandböden des südlichen Kaingaroa Waldes ebenfalls extrem arm an austauschbaren Mg-sowie Gesamt-Mg-Gehalten sind, wuchsen die jungen Bäume zunächst gut. Hunter et al. (1985) untersuchten den Mg-Ernährungszustand dieser Kiefern und fanden bereits zwischen 1976 und 1980 recht niedrige Mg-Spiegelwerte von nur $0,6 \text{ mg g}^{-1}$ TS Mg in den jüngsten Nadeln. Um 1980 wurden dann die ersten deutlichen Mg-Mangelscheinungen an jüngeren und älteren Einzelbäumen sowie kleineren Baumgruppen entdeckt. Die Gelbspitzigkeit der älteren und teilweise auch jüngeren Nadeln ging rasch in Nekrosen über. Starke Nadelverluste traten vor allem im unteren und mittleren Kronenbereich auf. Erst nach mehrjähriger starker Gelbspitzigkeit

zeigten sich Reduktionen im Höhenwachstum der Bäume. Von Anfang bis Mitte der 80er Jahre entwickelten sich auch im nördlichen Kaingaroa Forest auf einer Reihe tiefgründig Mg-armer Substrate typische Mg-Mangelscheinungen. Tabelle 10 gibt die Nadelgehalte von drei Einzelbäumen mit starken Mg-Mangelsymptomen auf einem typischen Mangelstandort dieses Gebietes wieder. Zur Beurteilung der Analysewerte sind in Tabelle 11 die für *Pinus radiata* gültigen Grenzwerte angegeben. Die Mg-Gehalte belegen den krassen Mg-Mangel der Probestämme. Dieser geht auch aus den extrem weiten N:Mg-Relationen hervor (gesunde Bäume N:Mg < 30; Hüttl 1991). Des Weiteren sind die Ca-Gehalte von Baum B und C unzureichend. Die Versorgung mit den übrigen Nährelementen ist ausreichend bis gut. Die Al-Gehalte sind hoch. Sie stehen im Einklang mit den hohen Al-Konzentrationen dieser Böden. Nach Hunter et al. (1986) ist der Mg-Mangel bei *Pinus radiata* im Kaingaroa Forest rein bodenbürtiger Natur.

Probebaum	N	P	mg g ⁻¹ TS			Mn	Zn	µg g ⁻¹ TS		N:Mg
			K	Ca	Mg			Fe	Al	
A	15,1	1,2	4,5	1,2	0,23	510	20	82	730	66
B	n.b.	1,9	5,2	0,7	0,18	388	19	78	500	-
C	17,2	1,3	6,4	0,7	0,22	460	17	61	600	78

Tabelle 10

Elementgehalte in 1jährigen gelbspitzigen Nadeln von 8jährigen *Pinus radiata*-Bäumen auf einer flachgründigen stark sauren skelettreichen rhyolitischen Bimssteindecke über Fließ-Tephrit im nördlichen Kaingaroa Forest/Neuseeland vom Herbst 1987

Element	mangelhaft	ausreichend		gut
		mg g ⁻¹ TS		
N	< 12,0	12,0-15,0		> 15,0
P	< 1,2	1,2-1,4		> 1,4
K	< 3,0	3,0-5,0		> 5,0
Ca	> 1,0	1,0		> 1,0
Mg	> 0,7	0,7-1,0		> 1,0
µg g ⁻¹ TS				
Mn	< 10	10-20		> 20
Zn	< 10	10-20		> 20

Tabelle 11

Elementgehalte in einjährigen Nadeln zur Beurteilung des Ernährungszustandes von *Pinus radiata* (vgl. Hüttl 1991)

Erstaunlich ist nun die Übereinstimmung des „neuen“ Mg-Mangels bei *P. radiata* im Kaingaroa Forest Neuseelands und bei Fichte in Deutschland, beispielsweise im Grundgebirgs-Schwarzwald. In beiden Gebieten wurden die ersten deutlichen Mg-Mangelsymptome Mitte der 70er Jahre entdeckt. Seit etwa 1980 treten an beiden Orten die Schäden großflächiger auf (Will 1985). Dabei werden kranke Bäume direkt neben gesunden beobachtet, von Einzelbäumen breitet sich die Erkrankung auf größere Gruppen aus. Bei Trockenheit treten die Symptome weit deutlicher hervor als bei ausreichender Wasserversorgung. Natürliche Regenerationserscheinungen sind ebenso zu beobachten wie Revitalisierungsreaktionen als Folge von Mg-Zufuhr (Hunter et al. 1986, Hüttl 1985, Hüttl und Schaaf 1997).

Nach Düngung mit $MgSO_4$ wurden in beiden Gebieten neben erhöhter Mg-Aufnahme gelegentlich positive Reaktionen der Bäume auf das verbesserte S-Angebot registriert. Bemerkenswert ist weiter die Übereinstimmung standörtlicher Parameter. In beiden Fällen ist das Klima gemäßigt, wenngleich im Schwarzwald die Witterungsextreme vor allem im Winter ausgeprägter sind. Die mittleren Jahresniederschläge sind mengenmäßig gut vergleichbar. Die Verteilung während des Jahres ist jedoch im Kaingaroa Forest gleichmäßiger. Aus bodenchemischer Sicht sind die sauren basenarmen lehmig-sandigen Braunerden bis Podsole über Granit des Südschwarzwaldes den jüngeren, aber dennoch sehr sauren basenarmen durchlässigen Böden im nördlichen Kaingaroa Forest ähnlich. So liegen z. B. die Mg-Gesamtgehalte im durchwurzelten mineralischen Solum am Standort Kälbelescheuer im Südschwarzwald bei rund $12.000 \text{ kg ha}^{-1}$ (Mies 1987) und im Kaingaroa Forest bei $12.900 \text{ kg ha}^{-1}$ (Hunter et al. 1986). Die in beiden Fällen mit sauren Extraktionsverfahren ermittelten austauschbaren Mg-Anteile betragen 0,59 % bzw. 0,62 %. Die pflanzenverfügbaren Bodengehalte liegen bei der Fläche Kälbelescheuer unter $2 \mu\text{g g}^{-1}$ und die Mg/Al-Quotienten sind extrem niedrig. Beides ist für das neuseeländische Substrat sehr ähnlich (Hunter, mündl. Mitt.).

Aufgrund dieser vergleichenden Betrachtung stellt sich zwangsläufig die Frage, warum der Mg-Mangel im Südschwarzwald nicht ebenso wie im Kaingaroa Forest Neuseelands als standörtliches, insbesondere bodenbürtiges Problem anzusehen ist. Immissionseinflüsse wären aus dieser Sicht allenfalls als mitwirkende Faktoren einzustufen. Die auslösende Ursache sichtbarer Symptome wäre dann vor allem auf Witterungsextreme (z. B. Trockenheit) zurückzuführen. Auch in Neuseeland treten Mg-Mangelschäden nicht nur im Kaingaroa Forest, sondern ebenfalls in anderen Gebieten der Nordinsel (z. B. im Waimihia Forest) auf. Darüber hinaus sind auf der Südinsel auf sauren basenarmen sandig-lehmigen Böden der Nelson- und Westland-Region Mg-Mangelercheinungen bei verschiedenen Baumarten bekannt (Will 1985).

Abschließend soll noch ein interessanter Befund einer neuseeländischen Untersuchung zur Mg-Aufnahme der Fichte angefügt werden. Um die Anbaumöglichkei-

ten von *Picea abies* für bestimmte Standorte Neuseelands zu prüfen, wurden 1983 Provenienzversuche mit drei verschiedenen Fichtensorten auf einem einheitlichen Substrat eines aufgelassenen Pflanzengartens in der Nähe von Roturoa angelegt. Bei der Sorte *Bregentrved Rumania* wurde im Herbst 1987 leichte Gelbspitzigkeit an den älteren Nadeln festgestellt. Die Nadelanalyse bestätigte diese Symptome als Mg-Unterversorgung (Tab. 12), während die beiden anderen Fichtenprovenienzen zwar unterschiedliche, aber jeweils ausreichende bis gute Mg-Spiegel aufwiesen. Die übrigen Nährelemente lagen bei allen drei Sorten ohne größere Variationen im Bereich ausreichender bzw. guter Versorgung. Nach dem Anbau dieser Provenienzen im Waimihia Forest, der standörtlich mit dem Kaingaroa Forest vergleichbar ist, traten keine sichtbaren Mangelsymptome auf. Trotzdem reflektierten die Nadeluntersuchungsergebnisse dieser Kulturen dieselbe Differenzierung der Mg-Ernährung.

Aus dieser Studie läßt sich erkennen, daß offensichtlich auch genetische Faktoren eine Rolle bei der Mg-Aufnahme der Fichte spielen. Dies könnte einer der Gründe sein, der zu dem bei Mg-Mangel recht ausgeprägten „gesund-neben-krank“-Phänomen führt (vgl. Hüttl und Schaaf 1997).

Weitere Beobachtungen zur sorten- bzw. artspezifischen Nährelementaufnahme auf einheitlichen Substraten beschrieb Hüttl (1991).

Standort	Sorte*	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	B	Cu
				mg g ⁻¹ TS				µg g ⁻¹ TS		
Rotorua	Bregentrved Rumania	14,1	1,4	6,1	6,1	0,66	199	30	21	3,6
	Moldovita Rumania	14,8	1,6	6,5	7,9	0,95	294	42	23	3,8
	Tarndale Fres	11,6	1,5	5,8	6,9	1,04	261	59	24	4,6
Waimihia Forest**	Bregentrved Rumania	12,6	2,0	7,0	7,1	0,80	284	72	24	3,2
	Moldovita Rumania	13,3	1,9	6,8	6,7	0,91	278	63	19	3,1
	Tarndale Fres	12,3	1,7	6,4	7,8	1,05	269	74	22	3,0

* Pflanzjahr jeweils 1983

** aus Hunter (unveröffentlicht)

Tabelle 12

Elementgehalte in 1jährigen Nadeln von drei *Picea abies*-Sorten auf zwei verschiedenen Standorten der Nordinsel Neuseelands vom Herbst 1987

Hypothesen zur Erklärung der Ernährungsstörungen

Zur Erklärung der neuartigen Waldschäden wurde eine Vielzahl von Hypothesen formuliert. Im folgenden werden diejenigen Erklärungsansätze diskutiert, die vornehmlich auf die Kausalität der Ernährungsstörungen in geschädigten Waldökosystemen gerichtet sind. Diese lassen sich in zwei Kategorien einteilen, nämlich solche mit direkter und solche mit indirekter Wirkung. Dabei können direkte und indirekte Wirkungspfade kombiniert auftreten und sind zudem nicht immer scharf voneinander zu trennen.

Direkte Wirkungspfade

Als direkte Wirkungspfade sind diejenigen Mechanismen und Prozesse zu verstehen, die unmittelbar auf die Bäume, d. h. auf deren Nadeln bzw. Blätter, einwirken und so Waldschäden hervorrufen.

SO₂ und NO_x

Nicht zuletzt aufgrund der Erfahrungen aus der klassischen Rauchschaadforschung wurden SO₂- und NO_x-Immissionen schon sehr früh mit den neuartigen Waldschäden in kausalem Zusammenhang gebracht. Allerdings ließ sich wegen des SO₂-Konzentrationsgradienten von städtischen zu ländlichen Räumen keine Korrelation zwischen den SO₂-Gehalten in der Atmosphäre und den neuartigen Waldschäden finden. Des Weiteren zeigt die Entwicklung der SO₂-Emissionen in Deutschland anders als die Resultate der Waldschadenserhebungen einen signifikant abnehmenden Trend. In den meisten Gebieten, in denen Waldschäden beobachtet wurden und werden, liegen die SO₂-Konzentrationen deutlich unter den IUFRO-Grenzwerten für den Schutz von Waldbäumen (IUFRO 1983, vgl. Wentzel 1988). Andererseits treten in Waldgebieten mit erhöhten SO₂-Immissionen wie im Ruhrgebiet mitunter nur geringe oder gar keine Schäden auf (Krause und Prinz 1989).

Deshalb können direkte SO₂-Schäden als ein flächig wirksamer Schadfaktor ausgeschlossen werden. Dieser Schluß wird auch durch histologische Befunde untermauert. Hüttl et al. (1989, vgl. Fink 1997) zeigten, daß phytotoxische SO₂-Konzentrationen in Koniferennadeln primär Zerstörungen im Mesophyllgewebe bewirken, und zwar in der Nähe der Stomata, dem Ort also, an dem alle gasförmigen Luftschadstoffe in die Nadeln und Blätter der Waldbäume gelangen. In Nadeln von Fichten aus den Hauptschadensgebieten Deutschlands konnten solche Veränderungen jedoch nicht beobachtet werden. Auch physiologische Untersuchungen über

Photosynthese- und Transpirationsraten von Fichtenzweigen, die am natürlichen Standort gefilterter bzw. SO_2 -haltiger Umgebungsluft ausgesetzt wurden, lieferten keinerlei Hinweise auf eine nachhaltige Wirkung „normaler“ SO_2 -Konzentrationen (Koch und Lautenschlager 1988). Allerdings fand Cornic (1987) nach fünfwöchiger Begasung mit einer subletalen SO_2 -Konzentration eine signifikante Reduktion der Photosyntheserate, wenn die Bäume zusätzlich starkem Trockenstreß ausgesetzt waren. Es ist aber anzumerken, daß hier wie in vielen anderen Begasungsexperimenten SO_2 -Konzentrationen benutzt wurden, die merklich über den in den geschädigten Waldbeständen anzutreffenden Gehalten lagen. Dazu kommt noch, daß die Ergebnisse von Kammerbegasungs-Experimenten nur sehr bedingt auf natürliche Waldbestände zu übertragen sind (vgl. Kenk et al. 1988); denn in der Regel handelt es sich dabei um Kurzzeitexperimente mit jungen Bäumen bei geänderten klimatischen Bedingungen. Schließlich belegen Nadelanalysen von Beständen in Waldschadensgebieten, daß die S-Gehalte nur gelegentlich über den als normal zu bezeichnenden Werten liegen (Hüttl 1991).

Im Gegensatz zu SO_2 haben die NO_x -Emissionen seit den 70er Jahren in Deutschland und vielen Gebieten Europas eher zugenommen (vgl. Hüttl et al. 1996). NO_x ist jedoch nicht sehr pflanzenwirksam (Taylor et al. 1975). Da wiederum ein abnehmender NO_x -Konzentrationsgradient von den städtischen zu den Waldgebieten existiert, kann auch NO_x als flächenwirksame Schadursache ausgeschlossen werden. Es läßt sich somit festhalten, daß SO_2 und NO_x als Einzelfaktoren nicht für die neuartigen Waldschäden verantwortlich gemacht werden können. Allerdings ist bekannt, daß SO_2 , NO_x und andere gasförmige Luftschadstoffe in ihrer Kombination einen weit größeren Negativeinfluß auf Waldbäume ausüben können, als sie dies als Einzelkomponenten bewerkstelligen (Slovik 1997).

Ozon

Ozon ist ein sekundärer Luftschadstoff. Ultraviolette Licht, NO_x , O_2 und reaktive Kohlenwasserstoffe sind notwendig, um O_3 entstehen zu lassen. Aufgrund steigender Emissionen von NO_x und chlorierten Kohlenwasserstoffen wurde vermutet, daß O_3 und andere Photooxidantien in den bodennahen Luftschichten Konzentrationen erreicht hätten, die zu Schäden an empfindlichen und weniger empfindlichen Pflanzenarten führen könnten (Arndt et al. 1982, Prinz et al. 1982, Guderian et al. 1985). Beispielsweise kann O_3 die Permeabilität der Zellmembranen im Blatt- bzw. Nadelgewebe von Waldbäumen erhöhen. In Verbindung mit hohen und/oder sauren Niederschlägen ist damit eine Zunahme der Auswaschungsraten von Nährionen und organischen Stoffen, die vergleichsweise mobil im Zellsaft sind, verknüpft (Keitel und Arndt 1983). In diesem Zusammenhang ist aber zu betonen, daß es bislang

nicht gelungen ist, die typischen Waldschadenssymptome in O₃-Begasungsversuchen oder in kombinierten O₃-Begasungs- und Benebelungsexperimenten zu reproduzieren. Häufig wurde jedoch erhöhtes Nährelement-Leaching festgestellt (z. B. Krause et al. 1983, Bosch et al. 1986). Es wurde deshalb vermutet, daß dieser Wirkungsmechanismus schließlich zu Nährstoffmangel führen könnte.

Histologische Untersuchungen erbrachten, daß akute O₃-Schäden, ähnlich wie auch direkte SO₂-Schädigungen, primär mit Veränderungen im Mesophyllgewebe verbunden sind (Fink 1988). Da aber Gewebeschäden in vergilbten Nadeln hauptsächlich im zentralen Leitbündel, also im innersten der Nadel, auftreten (Fink 1997), können akute O₃-Schäden nicht die primäre Ursache für Waldschäden sein, die mit Ernährungsstörungen einhergehen. Allerdings erlauben diese Befunde nicht, O₃ als chronischen Schadfaktor ernährungsspezifischer Walderkrankungen zu eliminieren. Bosch et al. (1986) konnten nämlich zeigen, daß O₃ in Kombination mit saurem Nebel, extremen Frostereignissen und sauren basenarmen Bodenbedingungen zu verstärkten Schäden bei Fichte führte, die mit Mg-Mangel und schwacher Ca-Ernährung gekoppelt waren. Auch Krause und Prinz (1989) vertreten aufgrund ihrer umfangreichen Untersuchungen zur Beteiligung von O₃ am Ursachenkomplex der neuartigen Waldschäden die Auffassung, daß O₃ in Kombination mit sauren Niederschlägen, geringer Vitalität der Bäume und einer niedrigen Nährelementversorgung des Bodens zumindest bei Fichte zu verstärkten Nährelement-Auswaschungsverlusten führen, die unter den vorherrschenden Witterungsverhältnissen in den Hochlagen der Mittelgebirge, z. B. im Eggegebirge, im Extremfall Mg-Mangel verursachen können. Allerdings bestätigen ihre Versuche auch, daß die durch O₃ allein induzierte Nährionenauswaschung nicht ausreicht, um die starken Nährelementverluste, wie sie in Freilandbeständen gelegentlich auftreten, erklären zu können. Die Autoren zeigten weiter, daß Laubgehölze wesentlich empfindlicher auf O₃-Begasung reagierten als Nadelbäume. Mit Hilfe äußerlich sichtbarer Blatt- bzw. Nadel-schädigungen stellten sie folgende Resistenzreihe auf: *Fagus silvatica* > *Quercus robur* > *Acer platanoides* > *Pinus nigra* > *Pinus strobus* > *Picea abies* > *Abies alba*. Auch diese Differenzierungen sprechen gegen O₃ als Primärfaktor der neuartigen Waldschäden, da im Rahmen dieser Erkrankungen zunächst Veränderungen bei Nadelgehölzen und erst später bei Laubbäumen beobachtet wurden.

Über Kombinationseffekte realistischer O₃-, SO₂- und NO₂-Konzentrationen bei Fichte und Pappel mit unterschiedlicher Mg- und Ca-Versorgung berichteten Guderian et al. (1985). In Abhängigkeit vom Mg- und Ca-Ernährungszustand der Pflanzen kam es zunächst zu verstärktem, mit zunehmender Ausprägung der Mangelsituation zu vermindertem Immissionseinfluß. Eine umfassende Zusammenstellung von Kombinationswirkungen gasförmiger Luftschadstoffe findet sich bei Guderian und Tingey (1987). Weitere Übersichtsarbeiten zum Einfluß von Ozon auf die Vitalität und das Wachstum der Waldbäume legten Pye (1988), Miller

(1989) sowie Miller et al. (1996) vor. Für die Interpretation von O_3 -Begasungsversuchen erscheint des weiteren eine Arbeit von Brown und Roberts (1988) wichtig. Demnach sind Begasungsexperimente, die mit O_3 durchgeführt wurden, das mit Hilfe ungereinigter Luft erzeugt wurde, wenig realistisch, da hierbei erhöhte Mengen von N_2O_5 entstehen, die ihrerseits gerade in Verbindung mit saurer Beregnung zu erhöhten Auswaschungsverlusten von NH_4 , Mg, Ca, Zn und Mn führen.

Von den relevanten gasförmigen Luftschadstoffen besitzt O_3 mit Bezug auf die Konzentration und Expositionsdauer die höchste Phytowirksamkeit. Es ist deshalb nicht auszuschließen, daß O_3 und andere Photooxidantien in bestimmten Gebieten eine mitwirkende Rolle beim Zustandekommen der Walderkrankungen spielen können, wie dies bei den Waldschäden in den Alpen vermutet wird. Als auslösender Faktor für Waldschäden, die mit Ernährungsstörungen gekoppelt sind, kommt O_3 , wie bereits oben gezeigt, aber nicht in Betracht.

Säure-Leaching

Als „Leaching“ wird die Auswaschung von Nährionen und Metaboliten aus den oberirdischen Organen einer Pflanze bezeichnet (Tukey 1970). Dieser Mechanismus ist seit langem bekannt (Arens 1934, Morgan 1963, Mecklenburg 1964). Die zur Kausalität ernährungsspezifischer Waldschäden formulierte Leaching-Hypothese geht deshalb davon aus, daß eine erhöhte Säurestärke der benetzenden Lösung eine verstärkte Stoffauswaschung zur Folge hat (Wisniewski 1982, Scherbatzkoy und Klein 1983). Daß dieser Prozeß zumindest nach einer Vorschädigung des Gewebes, beispielsweise durch gasförmige Luftschadstoffe, von Bedeutung sein kann, wurde bereits oben dargelegt. Da verschiedene Waldschadenstypen, insbesondere die Hochlagenerkrankungen der Fichte, mit häufigen Nebelereignissen verknüpft sind (Georgii und Schmitt 1985) und zudem Nebel im Vergleich zu Regen 10- bis 100fach höhere Säurekonzentrationen aufweisen kann (Waldmann 1985), wurden zahlreiche Benebelungs- bzw. Beregnungsexperimente durchgeführt. So stellten z. B. Mengel et al. (1987) bei jungen intakten Fichten fest, daß saurer Nebel (pH 2,75) signifikant höhere Mengen von K, Ca, Mg, Mn und Zn sowie Kohlenhydraten aus den Nadeln herauslöste, als dies bei der Kontrollvariante mit einem Nebel-pH von 5,0 der Fall war. Die absoluten Mengen ausgewaschener Nährionen waren jedoch gering und betrug nur wenige Prozent der in den Nadeln vorhandenen Nährelementmengen. Nur bei Zn beliefen sich die Leaching-Verluste auf die in den Nadeln normalerweise vorhandene Menge. Dennoch war bei Versuchsende der Zn-Gehalt in den Nadeln mit saurer Nebelbehandlung nicht niedriger als in den Nadeln der Kontrollfichten. Das ausgewaschene Zn konnte offensichtlich schnell ersetzt werden. Allerdings waren die Nadeln der sauren

Nebelvariante durch deutliche Schäden im Wachsüberzug charakterisiert. Mengel et al. (1988) fanden in demselben Versuch, daß die zusätzliche Düngung mit K ein verstärktes K-Leaching zur Folge hatte. Trotzdem waren die K-Gehalte im Vergleich zur Kontrolle sogar erhöht. Dies weist auf eine Überkompensation der Leaching-Verluste bei gutem Nährstoffangebot im Substrat hin. Die Behandlung mit saurem Nebel führte bei diesen eher kurzzeitigen Versuchen nicht zur Induktion von Nährelementmangel. Zu anderen Ergebnissen kamen Kaupenjohann et al. (1988). Durch Schwefelsäurebesprühung (pH 2,7) junger, in Nährlösung kultivierter Fichten erhöhte sich die Auswaschung von Mg so stark, daß nach Versuchsende deutlich verringerte Mg-Nadelgehalte gemessen wurden. Auch Kreuzer und Bittersohl (1986), die bei einem Fichtenjungbestand auf seinem natürlichen Standort eine sechsmonatige saure Beregnung (pH 2,72) durchführten, stellten bei Mg eine um den Faktor 4 bis 5 höhere Kronenauswaschung als auf der Kontrollparzelle, die mit „normalem“ Regen (pH 5,2) besprüht wurde, fest. Sie vermuteten deshalb, daß Säure-Leaching auf Mg-armen Standorten Mg-Mangel induzieren kann. Pfirrmann et al. (1988) konnten mit Hilfe von Säurebesprühungsversuchen verschiedener Fichtenklone zeigen, daß die Rate der Nährelementauswaschung genetisch mitbedingt ist. Des weiteren erhöht jede Art von Schädigung des Nadel- bzw. Blattgewebes die Leaching-Verluste. In diesem Zusammenhang sind Frostschäden, Insektenschäden, aber auch Wachsschäden zu nennen. Letztere bedingen zudem erhöhte Wasserverluste und stellen daher einen zusätzlichen Faktor für Trockenstreß dar.

Matzner und Ulrich (1984) postulierten, daß eine Konsumption von Protonen im Kronenraum nicht nur eine vermehrte Bioelementauswaschung zur Folge hat, sondern auch zu einer erhöhten Protonenabgabe im Wurzelbereich der Waldbäume führen muß, wenn der Protonenhaushalt der Bäume aufrechterhalten und ausgewaschene Nährstoffe wieder ersetzt werden sollen. Diesen auf Bilanzbetrachtungen beruhenden Schluß konnte auch Kaupenjohann (1997) bestätigen; denn er stellte bei Protonenbelastung der Kronen junger Fichten eine deutliche Versauerung der Rhizosphäre fest (vgl. Flückiger et al. 1989). Will man über die Bedeutung der durch Leaching bedingten Nährelementverluste genauere Information erhalten, ist es erforderlich, alle in einem Waldökosystem meßbaren Stoffflüsse zu erfassen und aus der Kronenraumbilanz die einer direkten Messung nicht zugänglichen Flüsse zu berechnen (Hüttl et al. 1996). Solche Untersuchungen liegen bislang nur vereinzelt vor. Mit akutem Nährelementmangel ist aber in jedem Fall erst dann zu rechnen, wenn die Rate der Auswaschungsverluste die Rate der Wiederaufnahme mehr oder weniger deutlich übersteigt.

Des weiteren werden die Leaching-Raten vom Baum- bzw. Bestandesalter beeinflusst. Bei Nadelbaumwäldern in schottischen Reinluftgebieten konnte Miller (1984) zeigen, daß die Kronentraufe von Beständen, die älter als 60 Jahre waren, deutlich höhere Protonenkonzentrationen enthielt als der Freilandniederschlag. Bei Bestän-

den unter 30 Jahren wurde diese Differenzierung nicht beobachtet. Stevens (1987) bestätigte diese Befunde für verschieden alte Fichtenbestände in Nordwales weitgehend. Zu ähnlichen Aussagen kamen auch Kaupenjohann et al. (1987) bei ihren Untersuchungen älterer und jüngerer Fichtenbestände im Fichtelgebirge.

Schließlich wiesen Alenäs und Skärby (1988) darauf hin, daß die Kronenauswaschung in den Bestandesrändern im Vergleich zum Inneren geschlossener Waldbestände in der Regel deutlich höher ist. Sie begründeten dies mit dem differenzierten Sedimentationsverhalten trockener Depositionen, deren Raten im Bestandestrauf normalerweise größer sind als in den dahinter liegenden Bestandesteilen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß erhöhte Protonen- wie auch Ammonium-einträge in Waldbeständen die Kronenauswaschung von Nährelementen wie Mg, Ca, K, Zn und Mn auch ohne Vorschädigung des Nadel- bzw. Blattgewebes deutlich steigern können. Es ist durchaus vorstellbar, wenn auch bislang im Experiment nicht verifiziert, daß dieser Mechanismus bei langjähriger Belastung mit sehr hohen Säure- und NH_4 -Einträgen zu Ernährungsstörungen führt. Da dieser Prozeß aber von vielfältigen Faktoren mitbestimmt wird, ist er als monokausaler Erklärungsansatz für die mit den neuartigen Waldschäden verknüpften akuten Nährelementmangelsituationen nicht geeignet.

Indirekte Wirkungspfade

Als indirekte Wirkungspfade werden hier diejenigen Mechanismen und Prozesse verstanden, die zu veränderten Substratbedingungen in Waldökosystemen führen und Ernährungsstörungen verursachen können.

„Saurer Regen“ – Bodenversauerung und Al-Toxizität

Die „Saure Regen“-Hypothese ist ein komplexer und kontrovers diskutierter Erklärungsansatz (z. B. Oden 1968, Ulrich et al. 1979, Abrahamsen 1980, Ulrich 1981 und 1986, van Breemen et al. 1983, Johnson und Reuss 1984, Zöttl und Hüttl 1986, Matzner 1987, Zöttl 1987 und 1990, Johnson 1988, Rehfuss 1989, Zöttl et al. 1989, Kaupenjohann 1989, Tomlinson 1990). Nachstehend werden im besonderen die ernährungsphysiologischen Aspekte dieser Hypothese erörtert.

Als ein für große Waldflächen problematisches Phänomen wurde der „Saure Regen“ von Oden (1968) entdeckt. Zur gleichen Zeit wiesen Rühling und Tyler (1968) auf den Ferntransport S-haltiger Schadstoffe hin. Was die geschichtliche Entwicklung der SO_2 -Emissionen anbelangt, so stiegen diese von 1900 bis 1972 in Europa von ca. 10 Mio. t auf 25 Mio. t pro Jahr an (Rodhe 1983). Die größte Zunahme fand nach 1950 statt. Anfang der 80er Jahre wurden jährlich rund 30 Mio. t SO_2

emittiert. Danach stagnierten die S-Emissionen bzw. nahmen regional mehr oder weniger stark ab (vgl. Hüttl et al. 1996). Die Emission der NO_x -Verbindungen, der anderen wichtigen Gruppe potentiell sauer wirkender Luftschadstoffe, nimmt in Europa noch zu. Neben den NO_x -Emissionen wurde in den letzten Jahren die landwirtschaftliche Intensivtierhaltung als wichtiger Emitent für Ammoniak identifiziert. Dabei ist zu berücksichtigen, daß NH_3 -Emissionen zu einer partiellen Neutralisation saurer Niederschläge beitragen.

Säureinträge können in Waldökosystemen zu einer Erniedrigung der Bodenalkalinität, d. h. zu einer Reduktion pflanzenverfügbarer Nährstoffe wie Ca, Mg und K führen. Sie können zudem die Erhöhung der Acidität des Bodens zur Folge haben. Bodenversauerung führt aber nur dann zu erniedrigten pH-Werten, wenn die Säuren durch Lösung oder Kationenaustausch in die Bodenlösung übergehen. Deshalb kann der Basengehalt im Boden abnehmen, ohne daß dabei der pH-Wert direkt verändert wird. Bei Belastung mit starken Säuren ($\text{pH} < 5$) kommt es zu einer Abnahme der Basensättigung und zur Akkumulation stärkerer Säuren, wenn die Rate der extern und intern generierten Säuren die Rate der Protonenkonsorption durch Freisetzung von Alkali- und Erdalkali-Kationen übersteigt. Da häufig angenommen wird – ohne dies jedoch hinreichend belegen zu können –, daß die Rate der Protonenkonsorption durch die Silikatverwitterung zumindest in Wirtschaftswäldern bereits durch die mit dem Zuwachs verknüpfte Protonenproduktion verbraucht wird, ergibt sich daraus, daß im Mittel der bewirtschafteten Waldökosysteme eine zusätzliche Säurebelastung aus saurer Deposition zur Bodenversauerung führen muß (Ulrich 1986). Durch Stickstoffvorratsabbau im Boden kann dieser Prozeß noch verstärkt bzw. beschleunigt werden.

Das Ausmaß der Bodenversauerung hängt demnach unter anderem von der Depositionsrate und -dauer der Säureinträge ab. Nach Winkler (1982) sind die pH-Werte im Regenwasser während der letzten 40 bis 50 Jahre in Mitteleuropa mehr oder weniger konstant geblieben. Ulrich (1986) errechnete, daß seit 1930 mit den Niederschlägen durchschnittlich mindestens $0,8 \text{ kmol ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ Protonen in die Waldökosysteme gelangten. Allerdings dürften diese Eintragsraten in Gebieten mit größeren Staubemissionen stets deutlich geringer gewesen sein. Auch heute indizieren die vielerorts durchgeführten Depositionsmessungen eine beachtliche regional und lokal differenzierte Variabilität der H-, S- und N-Einträge (vgl. Feger et al. 1997). Modifizierend wirkt offensichtlich vor allem die trockene Deposition.

Es überraschte daher nicht, daß für saure basenarme Böden als Folge erhöhter anthropogener Säureinträge historische Veränderungen im chemischen Bodenzustand nachgewiesen wurden (z. B. Hallbäck und Tamm 1986). Ein Absinken der pH-Werte und/oder der Gehalte austauschbarer basischer Kationen hat während der letzten Jahrzehnte in verschiedenen Waldböden Nord- und Zentraleuropas sowie in Teilen der USA und Kanadas stattgefunden, wofür Berden et al. (1987) sowie

Katzensteiner und Glatzel (1997) umfangreiche Listen von Untersuchungen lieferten. Für Nordamerika wird dies auch von Johnson et al. (1993) angenommen. Allerdings beurteilen diese Autoren Auswirkungen dieses Prozesses differenziert, wobei davon ausgegangen wird, daß es eine Reihe von Waldökosystemen gibt, die auf die aktuelle Eintragssituation positiv reagieren.

Andererseits blieb der Hinweis auf extern beschleunigte Bodenversauerung nicht unwidersprochen. Zum einen ist der Boden-pH eine quantitative Größe, die von Tag zu Tag und von Monat zu Monat in Abhängigkeit von den Bodenbedingungen variiert (Riebeling und Schäfer 1984). Zum anderen stellt der Prozeß des Bestandeswachstums ein größeres Versauerungspotential dar, als bislang angenommen wurde. Dies gilt nicht nur für die Fichte (Miles 1985), wengleich diese Tendenz hier besonders stark ausgeprägt ist. Holstener-Jørgensen et al. (1988) stellten nach einer über 20jährigen Beobachtungszeit für zehn Nadelbaumarten sowie für Eiche und Buche ein vom Grundflächenzuwachs abhängiges Absinken des pH-Wertes im obersten Mineralboden (0–5 cm) fest. Dabei nahm der pH-Wert um 0,24 Einheiten pro $1 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ Grundflächenzuwachs ab, und zwar unabhängig von der Baumart. Die Zunahme der Bodenversauerung wurde auf die zuwachsbedingte Festlegung basischer Kationen im Holz zurückgeführt. Daneben existieren weitere, die Bodenversauerung in Waldökosystemen akzelerierende Faktoren, z. B.

- Reduktion der Einträge säureneutralisierender Stoffe (vgl. Hüttl et al. 1996),
- Zunahme der Bestandesproduktivität (z. B. Beseitigung von N-Mangel; Anstieg der atmosphärischen CO_2 -Konzentration; regional günstigere Witterungsverhältnisse; vgl. Spiecker et al. 1996),
- Erhöhung des Biomasseentzuges,
- verstärkte Nitrifikation („priming effect“; Zöttl 1990) oder S-Oxidation,
- geänderte Landnutzungsformen (z. B. Aufforstungen),
- Anbau stärker versauernd wirkender Baumarten in Reinbeständen (z. B. Fichte oder Kiefer),
- intensivierete Forstwirtschaft (z. B. Durchforstungen),
- erhöhte Produktion und vertikale Verlagerung organischer Säuren sowie
- gehemmte Zersetzung der organischen Auflage.

Ein weiterer Effekt der Bodenversauerung ist die Freisetzung potentiell toxischer Metallionen wie Al^{3+} . In stark versauerten Waldböden werden besonders bei Versauerungsschüben Säurekonzentrationen (Al, H) und Säure-Basen-Relationen (Ca/Al-, Mg/Al-Verhältnisse) erreicht, die in Hydrokulturexperimenten mit nicht mykorrhizierten Fichten- und Buchenkeimlingen Wurzelschäden verursachten (Matzner et al. 1985, Rost-Siebert 1983 u. 1984). Zu dieser als Aluminium- oder Säuretoxizität bezeichneten Hypothese liegen zahlreiche Aussagen vor, die hier nur auszugsweise diskutiert werden können.

Zur Beurteilung einer möglichen Al-Toxizität ist es entscheidend zu wissen, in welcher Form das Aluminium im Boden vorliegt (Prietz et al. 1989, Feger 1993). Toxische Al-Fraktionen sind vor allem die labilen monomeren inorganischen Species. Dabei scheint der chemisch aktive monomere Al-Anteil in der Bodenlösung ein besseres Beurteilungskriterium zu sein als die Gesamtgehalte löslichen oder austauschbaren Aluminiums in der Bodenfestphase (Matzner 1987). Potentiell toxische Al-Gehalte sind vor allem in mineralischen Böden mit geringen Humusgehalten zu erwarten (Feger et al. 1990). Organische Stoffe wie auch organische Säuren, die unter anderem von den Baumwurzeln ausgeschieden werden, sind in der Lage, Al zu komplexieren. Vermutlich können sich viele Waldbaumarten dadurch vor Al-Toxizität schützen (vgl. Kreuzer 1995). Verschiedene Experimente zur Prüfung der Al-Hypothese indizieren, daß die Fichte im Vergleich zur Buche und Kiefer als eine relativ Al-sensitive Baumart einzustufen ist (vgl. Feger et al. 1990). Allerdings liegen die Al-Gehalte, die selbst unter extrem ungünstigen bodenchemischen Freilandbedingungen angetroffen werden, weit unter den Konzentrationen, die experimentell benötigt wurden, um bei den genannten Baumarten Al-bedingte Wurzelschäden zu erzeugen (z. B. Eldhuset et al. 1987).

Abgesehen von dem direkten Al-Einfluß auf die Wurzeln der Pflanzen kann Al die Aufnahme bestimmter Nährelemente beeinflussen. Dabei handelt es sich um Antagonismen im Substrat oder um physiologische Interaktionen innerhalb der Pflanze. So konnten beispielsweise die negativen Einflüsse von Al bei Buche und Fichte in Gegenwart erhöhter austauschbarer P-, K-, Ca- und Mg-Bodengehalte deutlich reduziert werden (van Praag und Weisen 1985). Da Al und P leicht als Al-Phosphate auf oder innerhalb der Wurzel ausfallen, können sehr hohe Al-Konzentrationen P-Mangel induzieren (Stienen 1985). Jorns (1988) fand bei Al-behandelten Fichtensämlingen neben einer deutlichen Steigerung der P-Gehalte in den Wurzeln auch eine Zunahme der P-Spiegel in den jüngeren Nadeln. Gleichzeitig kam es zu einer Abnahme der P-Gehalte in den älteren Trieben, was auf eine verstärkte Verlagerung in den Bäumchen hindeutete. Joslin et al. (1988) konnten bei Fichte keine Al-bedingte Behinderung der P-Aufnahme oder des P-Transportes finden. Erhöhte P-Nadelspiegel wurden bei Al-behandelten Douglasien gefunden, während bei Eiche (*Quercus robur*), Birke, Kiefer und Lärche (*Larix decidua*) Al keinen Einfluß auf die P-Blatt- bzw. -Nadelgehalte hatte (Keltjens und van Loenen 1989). Im Waldökosystem sind demzufolge die Interaktionen von Al und P bei der Nährstoffaufnahme bzw. im Pflanzenkörper noch unklar, deuten aber auf ein baumartenspezifisches Verhalten hin (vgl. Hüttl und Bellmann 1997).

Für eine Reihe verschiedener Baumarten wurde demonstriert, daß hohe Al-Gehalte im Boden die Ca-Aufnahme hemmen (vgl. Andersson 1988). Andererseits können hohe Ca-Konzentrationen die schädigende Wirkung von Al reduzieren. Aufgrund dieser Zusammenhänge wurde versucht, Ca/Al-Verhältniswerte zu finden, die

ungehindertes Wurzelwachstum garantieren. Für Fichte (und Buche) empfahl Rost-Siebert (1983) ein Ca/Al-Verhältnis in der Bodenlösung von 1,0 und Cronen et al. (1987) von 0,2 für *Picea rubens*. Zöttl (1990) wies jedoch darauf hin, daß die Wurzeln älterer Fichten unter natürlichen Standortbedingungen selbst bei einem Ca/Al-Wert von 0,06 in der Bodenlösung ungeschädigt blieben. Ebben (1989) stellte bei Altbuchen im Solling erst bei einem mittleren Ca/Al-Verhältnis von 0,014 eine deutliche Reduktion des Wurzellängenwachstums fest.

Von besonderem Interesse sind die Beziehungen zwischen Al und Mg. Hohe Mg-Konzentrationen im Substrat oder in der Nährlösung wirken der Al-Toxizität entgegen (vgl. Jorns und Hecht-Buchholz 1985). Dagegen behindern hohe Al-Gehalte im Boden die Mg-Aufnahme. Dies führt zu reduzierten Mg-Gehalten in der Pflanze, was für eine Reihe von Nadel- und Laubgehölzen nachgewiesen wurde (Stienen 1985, Jorns und Hecht-Buchholz 1985, Joslin et al. 1988, Liu 1988, Keltjens und van Loenen 1989, Kaupenjohann und Zech 1989). Zu Mg-Mangel kommt es aber nur, wenn das Mg-Angebot unzureichend ist (vgl. Hüttl 1993).

Unterschiedliche Beobachtungen liegen über den Transport von Al in der Pflanze vor. Häufig wird angenommen, daß Al in den Wurzeln der Waldbäume oder bereits auf der Wurzeloberfläche akkumuliert wird (z. B. Stienen 1985). Keltjens und van Loenen (1989) zeigten, daß bei Zugabe von Al in die Nährlösung die Al-Spiegelwerte von Douglasie und Kiefer anstiegen, während dies bei Eiche und Birke nicht der Fall war. Dies würde auf ein artspezifisches Verhalten bei der Al-Verlagerung hindeuten, worauf auch die Untersuchungen von Makonen-Spiecker (1985) hindeuteten (vgl. auch Stienen und Bauch 1988). Asp et al. (1988) behandelten Fichtenklone in Nährlösungen mit unterschiedlichen, aber realistischen Al-Konzentrationen und stellten geringe Unterschiede zwischen den Klonen fest. Alle Fichten nahmen relativ hohe Al-Mengen auf, wovon bis zu 30 % in den Sproß transportiert wurden.

Schließlich bestätigten die diskutierten Experimente fast ausnahmslos, daß große Al-Konzentrationen in der Bodenlösung das Wachstum nicht-mykorrhizierter Feinwurzeln behindern (z. B. Godbold et al. 1988). Entscheidend für die Mobilität von Al in der Rhizosphäre ist hierbei die Form der N-Ernährung, da dadurch der pH-Wert des wurzelnahen Raumes maßgeblich mitbestimmt wird. So führt NO_3 -Ernährung zur Reduktion der Al-Verfügbarkeit. Bei NH_4 -Aufnahme ist die Beweglichkeit von Al erhöht; zudem ist ein NH_4/Al -Antagonismus denkbar. Die toxische Al-Wirkung kann durch verschiedene Schutzstrategien der Waldbäume reduziert bzw. völlig eliminiert werden (vgl. Kreuzer 1995):

- Aktiver Ausschlußmechanismus durch
 - a) Exudation von chelatisierenden Stoffen als organische Säuren oder
 - b) pH-Wert-Erhöhungen in der Rhizosphäre bedingt durch Wurzelausscheidungen;

- Immobilisierung von Al in bzw. auf den Wurzeln;
- Toleranz hoher Al-Blatt-/Nadelgehalte;
- Fähigkeit, P, Ca und Mg auch in Gegenwart von hohen Al-Gehalten aufnehmen zu können.

Abschließend ist für alle hier vorgestellten Resultate nochmals zu betonen, daß sie auf Experimenten mit nicht-mykorrhizierten jungen Bäumchen beruhen. Normalerweise sind Waldbäume aber mit Mykorrhizen ausgestattet. Gerade unter Streßbedingungen stellt diese Pilzsymbiose einen wichtigen Faktor bei der Nährstoff- und Wasseraufnahme dar (Münzenberger et al. 1997, Jongmans et al. 1997). Deshalb können die Laborexperimente – wenn überhaupt – nur bedingt auf Freilandbedingungen übertragen werden. Mit Blick auf die hier diskutierte Hypothese läßt sich festhalten, daß viele Waldbäume vergleichsweise tolerant gegen Al-Toxizität sind. Offenbar haben sie sich evolutionär gut an saure Substratbedingungen angepaßt und adäquate Schutzstrategien gegen hohe Al-Bodengehalte entwickelt. Dies gilt in besonderem Maße für richtig ernährte Individuen (vgl. Schierl und Kreutzer 1990). Außer Zweifel steht, daß hohe austauschbare Al-Gehalte im Mineralboden bzw. in der Bodenlösung die Aufnahme verschiedener Nährelemente hemmen können. Die zur Erklärung der neuartigen Waldschäden postulierte Al-Toxizität konnte bislang unter natürlichen Standortbedingungen allerdings nicht verifiziert werden und scheidet als „globaler“ Kausalitätsansatz aus. Andererseits erscheint es möglich und nicht unwahrscheinlich, daß aufgrund beschleunigter Bodenversauerung infolge erhöhter anthropogener Säureinträge und verschiedener anderer Einflüsse bestimmte Böden derart an Mg verarmt sind, daß die aufstockenden Bestände nicht mehr ausreichend mit diesem Nährstoff versorgt werden können und akute Mangelsituationen auftreten.

N-Überangebot

Die noch immer zunehmende Verbrennung fossiler Stoffe bedingt steigende NO_x -Emissionen. Landwirtschaftliche Aktivitäten, vor allem intensive Viehwirtschaft, sind der Grund für die regional mitunter sehr hohen NH_3/NH_4 -Einträge. Nihlgard (1985) vermutete, daß erhöhte atmogene N-Depositionen in den Waldökosystemen die Ursache der neuartigen Waldschäden sein könnten und formulierte die sogenannte Ammonium-Hypothese. Dieses Erklärungsmodell wurde vielfach diskutiert (z. B. Meyer 1985, Mohr 1986, Matzner 1987, Schulze 1989, Zöttl 1989, Glatzel 1991, Kaupenjohann 1989, Aber et al. 1989, Hüttl 1990, Hüttl und Mueller-Dombois 1993, Bolte und Beck 1997). Im folgenden werden deshalb nur einige wesentliche Aspekte dieser Problematik aufgegriffen. Im übrigen wurde bereits

oben auf mögliche Auswirkungen hoher N-Depositionen mit Bezug auf die Nähr-elementversorgung von Waldbäumen und -beständen eingegangen.

Die N-Einträge in Waldökosysteme erfolgen in nasser, trockener und gasförmiger Phase und können über die Krone sowie von den Wurzeln aufgenommen werden. N-Austrag geschieht durch Auswaschung aus dem Solum, Entnahme von Biomasse und durch Abgabe in Form von Gasen aus dem Boden und der Vegetation. Diese Prozesse werden durch die verschiedenen Formen, in denen N vorliegen kann, modifiziert. Dazu treten vielfältige Wechselbeziehungen mit anderen Stoffen und Organismen auf (Zöttl 1960, Beese und Matzner 1987). Alle diese Vorgänge sind zudem standort- und bestandesspezifisch und werden durch klimatische und witterungsbedingte Faktoren mitgesteuert. Weiter ist zu beachten, daß die N-Depositionsraten regional und lokal stark differenziert sind. Sie variieren in Zentral-europa zwischen 9 und $> 100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ N. Üblicherweise steigt mit zunehmenden N-Inputraten das $\text{NH}_4\text{:NO}_3$ -Verhältnis weit über 1 an. Auch die Festlegung in der Biomasse von Waldbeständen umfaßt einen relativ weiten Variationsbereich. Für Nadelbaumbestände in Wirtschaftswäldern der gemäßigten Zone liegen die Werte zwischen 7 und 20 und für Laubholzbestände zwischen 5 und $15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ N (Beese 1986). Schließlich ist die Kapazität, Stickstoff in der organischen Auflage bzw. im humushaltigen Mineralboden zu akkumulieren, von Standort zu Standort verschieden (Bergmann 1997). Dementsprechend variieren die N-Vorräte in Böden zwischen 2.000 und $40.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ (Kreutzer 1990). Ebenso variieren die NO_3 -Austräge im Sickerwasser zwischen 0 und $> 100 \text{ mg l}^{-1}$. Über die standortspezifischen, für den N-Haushalt der Ökosysteme wichtigen biologischen Transformationsprozesse, wie N-Mineralisation, Nitrifikation, Ammonifikation und Denitrifikation – für die beiden letztgenannten Mechanismen existieren kaum quantitative Vorstellungen – kann hier nicht weiter berichtet werden. Von entscheidender, bislang nur unzureichend berücksichtigter Bedeutung bei der Beurteilung des N-Haushaltes eines bestimmten Bestandes ist des weiteren die Nutzungsgeschichte des spezifischen Standortes. Die vielfältige anthropogene Beeinflussung zahlreicher Waldstandorte während der vorausgegangenen Jahrhunderte hat Veränderungen der N-Flüsse verursacht, die auch heute noch die N-Bilanz vieler Waldökosysteme bestimmen, vor allem wenn diese nur moderate N-Einträge (ca. $10\text{--}20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) erhalten (Zöttl 1990). Beispielsweise berechnete Kreutzer (1990), daß durch die weithin übliche Streunutzung einem Waldbestand während einer Umtriebszeit rund 1.000 bis 1.300 kg ha^{-1} N entzogen wurden. Andererseits wurden zeitweise landwirtschaftlich genutzte Waldböden mitunter durch Zufuhr von Nährstoffen melioriert (Katzensteiner und Glatzel 1997).

Bereits aus diesen wenigen Daten und Interaktionen geht klar hervor, daß die Beurteilung des Stickstoffhaushaltes von Waldökosystemen sehr komplex sowie

standort- bzw. bestandesspezifisch ist und die atmosphären N-Einträge weithin nicht den entscheidenden Faktor darstellen.

Die aktuellen jährlichen N-Bestandesdepositionsraten, die in unbelasteten Gebieten kaum mehr als 1 bis 4 kg ha⁻¹ a⁻¹ N betragen (Husar und Holloway 1983, van Breemen 1990) liegen in Süddeutschland zwischen 9 und 40 kg ha⁻¹ a⁻¹ (Feger et al. 1990). In Norddeutschland sind sie im allgemeinen deutlich höher und können 60 kg ha⁻¹ a⁻¹ N übersteigen (vgl. Feger 1993). Da die Waldökosysteme Europas und Nordamerikas bei natürlichen N-Eintragsraten überwiegend durch N-Mangel-Situationen gekennzeichnet sind (Ellenberg 1986, Runge 1983, Johnson 1988, vgl. Beese und Matzner 1987), haben die gegenwärtigen N-Einträge eine Steigerung der Primärproduktion zur Folge, was sich auch in einem verstärkten Holzzuwachs dokumentiert. Eichhorn (1986), Abetz (1987), Kenk und Fischer (1988), Spiecker (1991), Becker et al. (1990) und Franz (mündl. Mitt.) stellten in Süddeutschland mit Hilfe detaillierter und umfassender ertragskundlicher Erhebungen deutliche Mehrzuwächse insbesondere bei Fichte im Vergleich mit Ertragstafeln bzw. Referenzdaten fest, die bereits Mitte der 60er Jahre einsetzten (vgl. auch Thren 1985, Gerecke 1986, Spiecker 1987, Abetz 1988). Ähnliche Ergebnisse liegen für Fichte und Tanne aus der Schweiz und Frankreich vor (Becker et al. 1990). Selbst in Süd-Finnland und -Norwegen mit vergleichsweise geringen N-Einträgen (4–8 kg ha⁻¹ a⁻¹; z. B. Mälkönen und Kukkola 1991) wurden seit Anfang 1960 jährliche Volumenzuwachssteigerungen bei Fichte von rund 0,5 m³ ha⁻¹ gemessen (Braekke 1990). Als Ursache dieser von Spiecker et al. (1996; Abb. 6) eindrucksvoll für fast ganz Europa nachgewiesenen Zuwachssteigerungen wurden neben regional verbesserten Witterungsbedingungen (erhöhte Niederschläge und Temperaturen; vgl. Fischer und Konnert 1989), intensivierter Forstwirtschaft, gestiegener atmosphärischer CO₂-Konzentrationen vor allem auch die erhöhten N-Einträge genannt. Nur in Beständen mit starken unspezifischen Nadel- bzw. Blattverlusten wurden Minderzuwächse beobachtet (z. B. Dong und Athari 1989, Spiecker et al. 1996). Dies gilt auch für Bestände mit Vergilbungserscheinungen und den damit einhergehenden spezifischen Nadelverlusten. Nach den Ergebnissen von Altherr und Evers (1975), Evers (1984), Dobertin (1985), Hauhs (1985), Roehle (1985), Aldinger (1987), Kandler et al. (1987), Rothe et al. (1988), Foerst (1989), Kaupenjohann (mündl. Mitt.) und Makkonen-Spiecker und Spiecker (1997) geht akuter Mg-Mangel bei Fichte und Buche mit Reduktionen im Volumenzuwachs von 20 bis 40 % einher. Diese Resultate sind durch Mg-Düngungsversuche gut belegt (vgl. z. B. Kenk et al. 1984). Kenkel und Reitter (1989) stellten anhand vergleichender Waldschadenserhebungen in Bayern zudem erhöhte Absterberaten bei Bäumen mit starken Vergilbungserscheinungen fest (vgl. auch Hüttl 1990). Demnach können bei der kausalen Bewertung der neuartigen Waldschäden waldwachstumskundliche Untersuchungen ohne die Erfassung der Nährelementversorgung nicht zu verlässlichen Aussagen führen.

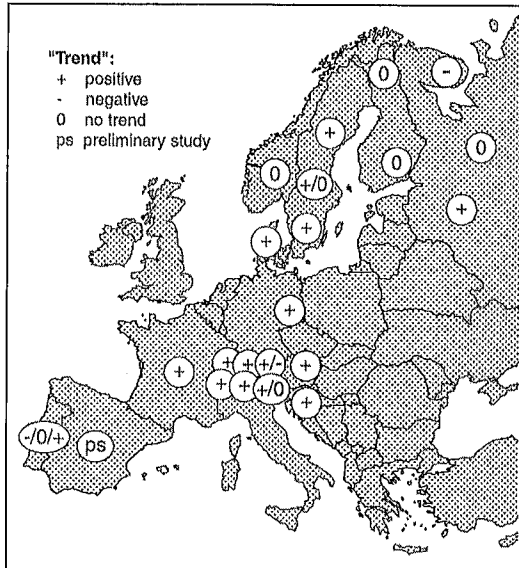


Abb. 6

Ergebnisse von Untersuchungen zum Waldwachstum in 12 europäischen Ländern, die belegen, daß der Holzvorrat in den europäischen Wäldern seit Anfang der 50er Jahre um über 40 % zugenommen hat (Spiecker et al. 1996).

Auswirkungen erhöhter N-Depositionen sind aufgrund der Beobachtungen aus N-Düngungsversuchen auch bei der Bodenvegetation, insbesondere der Krautschicht, zu erwarten. Beispielsweise Ellenberg jun. (1983 u. 1985 bzw. Jenssen (1996) haben diese Problematik analysiert und sehen die Ursache heute veränderter Bodenvegetation in Bewirtschaftungsänderungen, vor allem aber in der Beeinflussung des N-Haushaltes durch N-Immissionen. Demzufolge sind Veränderungen vor allem in extrem N-armen Vegetationsgesellschaften anzutreffen. Anhand vergleichender Studien in Norddeutschland haben Rost-Siebert und Jahn (1988) mit Blick auf die Veränderungen der Bodenvegetation während der letzten Jahrzehnte darauf hingewiesen, daß die Einwirkungen von Immissionen, die jeweils in ihrer Gesamtheit zu bewerten sind, auf verschiedenen Standorten unterschiedliche Veränderungsdynamiken auslösen. Solche Veränderungen müssen deshalb standörtlich differenziert dargestellt werden. Dies ist eine sehr verständliche Forderung, denn selbst, wenn man die NH_4/NO_3 -Einträge losgelöst von anderen Immissionen betrachtet, sind die bodenchemischen und -biologischen Auswirkungen von Standort zu Standort unterschiedlich und führen zwangsläufig zu einer ungerichteten Beeinflussung der Bodenvegetation. Dabei ist neben der Verbesserung des N-Angebotes durch

die N-Einträge auch das Potential zur Bodenversauerung herauszustellen. So kann NH_4 zu Aminosäure assimiliert werden, was mit einer äquivalenten Protonenproduktion verbunden ist. Bei Nitrifikation von z. B. 1 kmol NH_4 ist mit der Freisetzung von 2 kmol H zu rechnen. Hohe NO_3 -Einträge mit anschließender Nitratverlagerung erhöhen ebenfalls das Versauerungspotential des Bodens, da es zu einer äquivalenten Auswaschung basischer Kationen kommt.

Ein quantitativ und qualitativ verändertes N-Angebot beeinflusst die Nährelementversorgung der Bäume. Im Ionenhaushalt der Pflanze nehmen NH_4 und NO_3 eine Sonderstellung ein. Sie werden einerseits in weit größerer Menge als die anderen Ionen aufgenommen. Andererseits wird der Hauptteil von ihnen unter Abgabe von Ionenladungen metabolisiert. Außerdem beeinflussen sie die Aufnahme anderer Nährionen. Bei NO_3 als alleiniger N-Quelle nimmt die Pflanze mehr Anionen als Kationen auf. Bei NH_4 -Ernährung überwiegt die Kationenaufnahme. Der Anionen- wie Kationenüberschuß muß aus Gründen der Elektroneutralität kompensiert werden. Dies kann durch Abgabe organischer Anionen bzw. Kationen wie durch die Abgabe von H^+ bzw. OH^- in die Rhizosphäre erfolgen. Evers (1963) hat die Wirkung von NH_4 - und NO_3 -N-Ernährung auf das Wachstum und den Nährelementhaushalt von Fichte und Pappel bei verschiedenen Aciditätsstufen im Nährsubstrat untersucht. Neben der Bestätigung der genannten Zusammenhänge fand er ein artspezifisches Reaktionsmuster bei reinem NH_4 -Angebot. Die Pappel kompensierte die erhöhte Kationenaufnahme durch eine verstärkte Absorption von Anionen wie H_2PO_4^- , SO_4^{2-} und Cl^- . Die Fichte reagierte dagegen eher mit einer reduzierten Aufnahme von K^+ , Ca^{2+} und Mg^{2+} . Dieser Mechanismus war besonders deutlich bei saurer Reaktion des Substrates ausgeprägt und reduzierte die Aufnahme dieser Kationen um bis zu 50 %.

Aus Düngungsversuchen ist bekannt, daß Waldbäume N in der Regel in Abhängigkeit vom Angebot aufnehmen. Bei extrem hoher N-Verfügbarkeit kann dies unter bestimmten Bedingungen sogar zu N-Toxizität führen (vgl. Zöttl 1973, Heinsdorf 1988, Hippeli und Banse 1992). Einige Untersuchungen zum N-Ernährungszustand geschädigter Fichten auf stark versauerten Böden scheinen jedoch zu belegen, daß diese Bäume trotz schwacher bis sogar mangelhafter N-Ernährung das in der Bodenlösung reichlich angebotene NO_3 nicht aufnehmen (Schulze 1989, Kaupenjohann 1989, Wichtmann und Brückner 1989). Wenngleich bei steigenden NH_4^- , H- und Al-Konzentrationen in der Bodenlösung die NO_3^- -Aufnahme sinkt (Peuke 1987), ist damit eine unzureichende N-Ernährung der Fichte nicht zu erklären. Denn gerade bei sauren Bodenreaktionen scheint für ein gutes Wachstum dieser Baumart ein bestimmtes $\text{NO}_3^-:\text{NH}_4^-$ -Verhältnis notwendig zu sein. Daß Wurzelschäden die NO_3^- -Aufnahme einseitig behindern, ist wenig wahrscheinlich.

Wichtig und neu bei der Diskussion der Ammoniumhypothese ist die Tatsache, daß die N-Aufnahme nicht nur über die Baumwurzeln, sondern auch über die Krone,

d. h. über die Nadeln und Blätter der Waldbäume, erfolgt. Matzner (1987) konnte mittels Flüssebilanzen für je ein Fichten- und Buchenökosystem im Solling jährliche Aufnahmeraten von 9 bzw. 7 kg ha⁻¹ a⁻¹ wahrscheinlich machen. Schulze (1989) berechnete anhand von Elementflüssen, daß die Direktaufnahme von N über die Krone bei gesunden Fichten im Fichtelgebirge etwa 8 % der Gesamtaufnahme beträgt, während sie bei geschädigten gelbspitzigen Bäumen bis zu 20 % erreichen kann. Es ist davon auszugehen, daß die N-Aufnahme über das Blatt von der Pflanze weniger gut reguliert werden kann, als die Aufnahme über die Wurzeln. Dies mag das Auftreten von Ernährungsstörungen begünstigen (vgl. Hüttl et al. 1996). Roelofs et al. (1985), Joslin et al. (1988), Flückiger (1989) und andere konnten experimentell sowie *in situ* zeigen, daß NH₄ die Auswaschung von Kationen aus der Baumkrone steigert. Davon scheint besonders K betroffen zu sein. Mengel et al. (1988) wiesen zudem ein starkes Mg-Leaching bei Fichte in NH₄-Benebelungsversuchen nach.

Abschließend ist festzuhalten, daß erhöhte N-Einträge in Waldökosysteme ernährungsphysiologisch differenziert betrachtet werden müssen. NH₄-N-Ernährung reduziert zumindest bei Fichte die K-, Mg- und Ca-Aufnahme und bewirkt erniedrigte pH-Werte in der Rhizosphäre. Dies erschwert die Aufnahme basischer Kationen zusätzlich, was schließlich zu geringeren K-, Mg- und/oder Ca-Spiegeln führt. Gesteigert wird dagegen die Aufnahme von Anionen, wie Phosphat und Sulfat. Nitraternährung wirkt entgegengesetzt. Hohe NH₄-Depositionsraten steigern aufgrund der Aufnahme über die Krone das Kationen-Leaching. Erhöhte N-Einträge können das Wachstum der Bäume fördern, die Bodenversauerung vorantreiben und somit auf nährstoffarmen Böden eine merkliche Verschlechterung des Basenhaushaltes der Waldökosysteme bewirken. Allerdings scheidet die Ammoniumhypothese als alleiniges Erklärungsmodell von weitverbreiteten Ernährungsstörungen schon wegen der regional und lokal stark differenzierten N-Eintragsraten aus, wie dies detailliert von Zöttl (1989), Hüttl (1991) und Nilsson et al. (1995) dargelegt wurde.

Standort- und bestandsspezifische Schäden infolge verschiedenartiger Kombinationen von Streßfaktoren – ein umfassender Erklärungsansatz

Die folgende Hypothese integriert die vorgenannten Kausalmechanismen teilweise und basiert auf der Beobachtung, daß die neuartigen Waldschäden häufig mit Ernährungsstörungen einhergehen, die durch spezifische Standort- und Bestandesbedingungen charakterisiert sind. Auf jeden Fall sind alle Umwelteinflüsse, die auf die Waldökosysteme einwirken, nach Standort und Bestand differenziert zu betrachten. Deshalb ist es nicht möglich, einzelne Negativfaktoren für die neuartigen

Waldschäden insgesamt oder auch nur für die mit akuten Ernährungsstörungen gekoppelten Schadtypen verantwortlich zu machen.

Die am weitesten verbreitete Ernährungsstörung ist der Mg-Mangel. Neben Mg sind im wesentlichen die Elemente K, Ca, Mn und Zn mit den verschiedenen Schadtypen verbunden. Mit Hilfe historischer Nadelanalysevergleiche konnte gezeigt werden, daß es sich dabei um Ernährungsstörungen handelt, die sich häufig relativ rasch und fast gleichzeitig in verschiedenen Gebieten über große Waldflächen hinweg entwickelt haben und somit die Bezeichnung „neuartig“ rechtfertigen.

Beispielsweise demonstrierte Hüttl (1985) zwischen 1975 und 1983 eine deutliche Verschlechterung der Mg-Spiegelwerte von Fichtenbeständen auf sauren basenarmen Granit- und Gneisstandorten im Grundgebirgs-Schwarzwald, die zeitlich mit dem flächigen Auftreten der Gelbspitzigkeit zusammenfiel. Eine abnehmende Tendenz war zudem bei den Ca- und Zn-Spiegelwerten erkennbar. Zöttl und Hüttl (1985) konnten diese Veränderungen auch bei Tannenbeständen des Südschwarzwaldes feststellen. Bonneau und Landmann (1986) fanden ähnliche Veränderungen bei Tanne auf kristallinen Ausgangsgesteinen in den Vogesen. Auf Buntsandsteinflächen des nördlichen Schwarzwaldes und des Odenwaldes sowie auf Feuersteinlehmstandorten der Ostalb wies Evers (1988) zwischen 1968 und 1982 bzw. 1987 abnehmende Mg-Gehalte bei Buche und Fichte nach. Zwischen 1964 und 1981 hatten auch die Mg-Gehalte von Fichtenbeständen auf verschiedenen basenarmen Böden in Niedersachsen deutlich abgenommen (Reemtsma 1986). Vergleichbare Resultate liegen für Fichtenbestände auf Mg-armen Substraten im Taunus (Grünhage und Jäger 1988), in Hessen (Riebeling 1987) und in den Wuchsbezirken Rothaargebirge und Südsauerländer Bergland (Spelsberg 1988) vor. Teilweise gravierende Reduktionen der Mg-Spiegel verschiedener Fichten- und Tannenarten konnten Materna (1989) für Tschechien, Bernier et al. (1989) in Quebec und Robarge et al. (1989) in den südlichen Apalachen nachweisen. Auf gleichgerichtete historische Veränderungen der Mg-Verfügbarkeit des durchwurzelten Bodenraumes wurde oben bereits hingewiesen.

Andererseits ist Mg-Mangel bei Waldbäumen per se kein neues Erscheinungsbild. Die im norddeutschen Tiefland, wie in der Schorfheide oder im Emsland, auf sandigen Böden schon seit langem bekannte, eher kleinflächig auftretende Gelbspitzigkeit der Kiefer und Fichte, ist dort entweder auf das Jungstadium begrenzt (sogenannte Kinderkrankheit; vgl. Baule und Fricker 1967) oder findet sich auf landwirtschaftlich degradierten Böden. Dies gilt auch für die Mg-Mangelercheinungen bei verschiedenen Kiefernarten auf den Sandböden in den Adirondacks, die Stone bereits 1953 beschrieb (vgl. Bernier et al. 1989).

Neu ist dagegen das Auftreten dieser Erkrankung im akuten Stadium auf Standorten, auf denen der Schadtyp bis zur Entdeckung der neuartigen Waldschäden unbekannt war. Diese Feststellung wird auch dadurch nicht widerlegt, daß in jenen

Gebieten vereinzelt auch schon vor dem großflächigen Auftreten dieser Erkrankung Mg-Mangel beobachtet wurde, wie dies die oben genannten Untersuchungen belegen. Derartige Befunde deuten vielmehr auf eine allmähliche Entwicklung des Mg-Mangels hin. Es ist deshalb nicht unwahrscheinlich, daß das flächige Auftreten akuten Mg-Mangels durch extreme Witterungsverhältnisse wie vermehrte Trockenperioden Mitte der 70er Jahre bis Anfang der 80er Jahre ausgelöst wurde. Jedenfalls fällt das Abklingen der Mg-Mangelercheinungen, wie beispielsweise im Schwarzwald und im Bayerischen Wald, mit Jahren besserer Wasserversorgung zusammen. Auch Will (1985) berichtete, daß Mg-Mangel bei *Pinus radiata* in Neuseeland während trockener Sommer stärker und großflächiger auftrat als bei ausreichender Wasserversorgung. Heinsdorf (1973) fand, daß bei Kiefernjungwüchsen in der Schorfheide die jährlichen Witterungseinflüsse die Mg-Spiegelwerte mehr oder weniger deutlich modifizierten. Die Abhängigkeit der Gelbspitzigkeit der Fichte von der Wasserversorgung wurde ebenfalls bereits oben beschrieben.

Zur Erklärung der historisch belegten Veränderungen der Nährelementversorgung geschädigter Waldökosysteme wird zum einen angenommen, daß es in Abhängigkeit von den jeweils vorherrschenden Säure- und NH_4 -Einträgen, vor allem wenn diese als Nebel, Wolkenwasser oder Tau auftreten (vgl. Wisniewski 1982), zur erhöhten Auswaschung von Nährionen und Metaboliten aus dem Kronenraum kommt. Die Auswaschung aus den Blättern bzw. Nadeln kann durch eine vorausgegangene Schädigung des Zellgewebes (z. B. durch O_3) und/oder der Kutikula (z. B. durch Säureeinfluß) verstärkt sein. Die von diesem Prozeß betroffenen Nährionen sind Mg, Ca, K, Zn und Mn, da sie im Gewebe mobil oder austauschbar vorliegen. Als Reaktion versuchen die Bäume, die Verluste durch erhöhte Nährelementaufnahme aus dem durchwurzelten Solum zu kompensieren. Je nach der standortspezifischen Nährelementverfügbarkeit, die im wesentlichen vom geologischen Ausgangsmaterial, der Nutzungsgeschichte und der atmogenen Stoffdeposition abhängt, wird dieser Reaktionsversuch des Baumes mehr oder weniger erfolgreich sein. Die Wiederaufnahme ist zwangsläufig mit erhöhtem Energieaufwand verbunden, führt zu einem beschleunigten Elementumsatz und kann über eine erhöhte Protonenextrusion der Wurzeln zur Versauerung der Rhizosphäre insbesondere auf basenarmen Standorten führen. Dieser Wirkungspfad wird aber nur dann akuten Nährelementmangel verursachen, wenn die Leaching-Verluste längere Zeit über der Rate der Wiederaufnahme liegen. Dies ist aber nur in Extremfällen wahrscheinlich.

Als gleichgerichteter, aber wesentlich bedeutenderer Mechanismus wird zum anderen die unter kühl-humiden Klimabedingungen natürlicherweise ständig vorschreitende Bodenversauerung angesehen. Diese kann durch nutzungsbedingte Einflüsse der Vergangenheit, aber auch durch moderne forstwirtschaftliche Maßnahmen, wie Kultivierung produktiver Reinbestände, Anbau stark versauernd wirkender Baumarten, Kahlschlag und Ganzbaumernte, verstärkt sein. Des weiteren

wurde die Bodenversauerung – wenn auch standort- und bestandesspezifisch differenziert – aufgrund der seit langer Zeit erhöhten anthropogenen Säuredeposition vielerorts beschleunigt und verursacht Verluste basischer Kationen aus dem durchwurzelten Solum. Dieser Prozeß sollte sich vor allem dort bemerkbar machen, wo aufgrund der drastischen Reduktion der Staubemissionen in den 60er und 70er Jahren bzw. in Ostdeutschland seit Beginn der 90er Jahre beispielsweise die Sulfateinträge kaum mehr als Neutralsalze, sondern überwiegend als Säuren erfolgen (vgl. Hüttl et al. 1996). Diese Problematik wurde gerade in jüngster Zeit erneut diskutiert (Hüttl und Bellmann 1997).

Mit Ausnahme küstennaher Waldgebiete liegt die aktuelle atmogene Mg-Deposition in deutschen Waldökosystemen meist unter $2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. In den höheren Lagen der Mittelgebirge, also den typischen Standorten der Hochlagenerkrankungen, sinken die Mg-Einträge trotz höherer Niederschlagsmengen zum Teil unter $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ab und liegen damit deutlich unterhalb des jährlichen Mg-Bedarfs eines normal wüchsigen Fichtenbestandes. Dagegen beträgt die mittlere Mg-Depositionsrate mit den Regenniederschlägen in von meeresbürtigen Einträgen beeinflussten Gebieten wie in England $7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, wovon über 80 % marinen Ursprungs sind (Roberts et al. 1989). Hier wird demzufolge selbst auf sehr sauren basenarmen Granitstandorten kein Mg-Mangel beobachtet.

Bereits diese wenigen Zahlen und Zusammenhänge lassen vermuten, daß unabhängig vom standortspezifischen Mg-Angebot die Mg-Versorgung vieler Waldökosysteme durch die Mg-Eintragsraten früherer Jahrzehnte weitgehend gesichert war.

Als weiterer wichtiger Faktor für das hier erörterte Erklärungsmodell werden Antagonismen bei der Nährelementaufnahme erachtet. In stark versauerten Böden kann die Mg- und Ca-Absorption durch hohe Al-Gehalte gehemmt sein. Auf eher alkalischen Böden werden die intern oder extern generierten Protonen rasch neutralisiert. Danach steigt der pflanzenverfügbare Ca-Gehalt im Boden und vor allem in der Rhizosphäre an. Dies führt zu ungünstigen K/Ca-Relationen. Dadurch kann die K-Aufnahme behindert werden. Wenn sich die N-Versorgung aufgrund erhöhter Ammoniuminträge von der NO_3^- - zur bevorzugten NH_4^+ -Ernährung verschiebt, können ebenfalls Nährelementungleichgewichte induziert werden. Dies kann noch dadurch verstärkt werden, daß infolge besseren N-Angebots das Baumwachstum auf Substraten mit eher schwachem Nährelementangebot gesteigert ist und es zu typischen Verdünnungseffekten bis hin zu Mangelercheinungen kommt.

Die Bedeutung toxischer Elemente wurde mit Blick auf Al oben abgehandelt und beruht im Sinne der hier diskutierten Hypothese auf der antagonistischen Wirkung bei der Kationenaufnahme insbesondere des Mg. Hohe Konzentrationen gelöster Schwermetalle können Schäden an Feinwurzeln setzen. Godbold et al. (1985) konnten dies in Hydrokulturversuchen für Fichtensämlinge demonstrieren. Zöttl (1990)

wies jedoch darauf hin, daß diese Resultate mit Ausnahme weniger Extremstandorte nicht auf Freilandbedingungen übertragbar sind. Trüby und Zöttl (1988) konnten nämlich zeigen, daß Fichten auf extrem schwermetallhaltigen Substraten, wie Abraumhalden des Erzbergbaus, zwar in manchen Kompartimenten relativ große Pb-, Cd- oder Zn-Mengen akkumulieren, aber normal und ohne Schäden wachsen. Als Verursacher flächig auftretender akuter Ernährungsstörungen sind Schwermetalle jedenfalls auszuschließen.

Abgesehen von dem oben genannten Säure-Leaching erscheinen auch direkte Wirkungsmechanismen als auslösende Faktoren der Ernährungsstörungen nicht relevant zu sein. Beispielsweise konnten Lange et al. (1987; vgl. Slovík 1997) mit Hilfe eines eleganten Versuchs bei Fichte auf einem Hochlagenstandort im Fichtelgebirge mit vergleichsweise hoher SO₂-Belastung zeigen, daß SO₂ nicht die Ursache der Gelbspitzigkeit sein kann. Die in Verbindung mit starkem Mg-Mangel üblicherweise bei der Entwicklung des neuen Triebes einsetzende Vergilbung der letztjährigen Nadeln wurde durch Abbrechen der Knospen vor dem Austrieb unterbunden. Bei einem anderen Zweig desselben Baumes, bei dem zu Beginn des Frühjahres die Knospen nicht entfernt worden waren, kam es infolge der Verlagerung von Mg wie erwartet zu einer Vergilbung der letztjährigen Nadeln. Trotz derselben SO₂-Belastung, die im Versuchsjahr Tagesmittelwerte von bis zu 300 µg m⁻³ erreichte, war es bei den behandelten Zweigen zu keiner fortschreitenden Symptomausprägung gekommen.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß die beschriebene Arbeitshypothese die Kausalität aller neuerdings beobachteten Ernährungsstörungen (Mängel, Ungleichgewichte) erklärt. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Schäden bei Waldbäumen auf sauren oder eher neutralen Substraten auftreten. Das häufig schwache Nährelementangebot der Waldstandorte, das durch vielfältige anthropogene Einflüsse mitverursacht wurde, ist demnach als der entscheidende prädisponierende Streßfaktor anzusehen. Die anthropogene Beeinflussung der Atmosphäre, die daraus resultierenden, sich ständig nach Art, Form, Menge und Verhältnis ändernden Stoffeinträge in die Waldökosysteme sowie die damit verbundenen ökosystemaren Prozesse und Mechanismen stellen einen maßgeblichen mitwirkenden Faktor dar. Ungünstige Witterungsbedingungen können sowohl auslösenden wie auch mitwirkenden Charakter haben. Biotische Erkrankungen werden eher als Folgewirkungen eingestuft. Da die Konstellation der Kausalfaktoren in der Regel sehr komplex ist, sich diese zumindest partiell gegenseitig bedingen und zudem standort- bzw. bestandesspezifisch sind, können letztendlich die jeweiligen Ursachen spezifischer Schäden nur am Standort selbst bestimmt werden. „Globale“ Erklärungsansätze sind aus dieser Sicht wenig sinnvoll, insbesondere wenn damit unspezifische Schäden erklärt werden sollen. Abschließend ist zu betonen, daß der vorgestellte Erklä-

rungsansatz sowohl unter Freiland- als auch unter Laborbedingungen verifiziert wurde (z. B. Hüttl und Schaaf 1997).

Revitalisierung/Restabilisierung geschädigter Waldökosysteme

Nachdem klar war, daß die unzureichende Nährelementversorgung vieler Waldstandorte einen maßgeblichen prädisponierenden Faktor beim Zustandekommen verschiedener Waldschadensphänomene darstellte, wurden Maßnahmen zur Verbesserung des Nährelementangebotes bzw. des chemischen Bodenzustandes geschädigter Waldökosysteme geprüft und schon bald praktiziert. Eine Verbesserung des Nährelementangebotes ist relativ einfach durch die Anwendung von Mineraldüngern möglich. Voraussetzung für ein gezieltes Eingreifen ist die nadel- und bodenanalytisch ermittelte Kenntnis des Ernährungszustandes des geschädigten Bestandes. Um den negativen Auswirkungen saurer Einträge bzw. der beschleunigten Bodenversauerung entgegenzuwirken, wurde die Applikation von Kalken vorgeschlagen (Ulrich 1972, 1986, Gussone 1984). Nährstoffapplikationen, die primär auf die Beseitigung von Ernährungsstörungen abzielen, werden dabei als Revitalisierungsdüngungen bezeichnet. Unter Restabilisierungsmaßnahmen versteht man die Anwendung von Kalken und/oder Düngern, die aufgrund einer nachhaltigen Verbesserung des chemischen Bodenzustandes auf eine Melioration des Gesamt-Ökosystems gerichtet sind.

Düngungsversuche sind eine klassische Methode, um zu diagnostizieren, ob Waldschäden auf Ernährungsstörungen beruhen. Durch Applikation von rasch löslichen Düngemitteln läßt sich innerhalb kurzer Zeit prüfen, ob diese Schäden abgemildert oder sogar völlig behoben werden können. Im Falle von Mg-Mangel sollte dies zumindest mittelfristig auch durch die Anwendung von Mg-haltigen Kalken möglich sein. Des weitern ist bekannt, daß durch gezielte Düngung die Resistenz der Bäume gegen die Einwirkung von Luftschadstoffen im Bereich subletaler Konzentrationen verbessert werden kann (z. B. Däßler und Ranft 1986). In Waldgebieten mit ernährungsspezifischen Schäden wurden deshalb seit Beginn der 80er Jahre zahlreiche diagnostische Düngungs- und Kalkungsversuche angelegt (vgl. Hüttl 1990, Hüttl und Schaaf 1997).

Mg-Düngungsversuche

Da Mg-Mangel die auffälligste und am weitesten verbreitete akute Ernährungsstörung darstellt, existieren hierzu zahlreiche Düngungsversuche. Schon sehr bald haben Hüttl (1987), Liu (1988), Kaupenjohann (1989), Ende (1990), Evers und

Hüttl (1990), Tomlinson (1990), Zöttl (1990) und andere hierzu Ergebnisse vorgelegt. Daraus geht eindeutig hervor, daß Mg-Mangel bei Fichte, Tanne, Kiefer, Douglasie und Buche durch die Applikation von wasserlöslichen Mg-Düngern rasch behoben werden kann. Auch die Anwendung von Mg-haltigen Kalken kann die Mg-Versorgung verbessern, wenngleich die Wirkung des Kalkes je nach Mahlfineinheit, Mg-Gehalt und Aufwandmenge in der Regel weniger schnell erfolgt. Neben der Verbesserung der Mg-Ernährung der Bäume wird durch diese Maßnahmen eine Erhöhung der austauschbaren Mg-Gehalte im durchwurzelten Solum erzielt (vgl. Hüttl und Fink 1988, Kaupenjohann 1989, Feger et al. 1990). In der Zwischenzeit haben sich die Düngewirkungen als langandauernd bestätigt (Schaaf 1997). Da die ernährungs-, boden- und ertragskundlichen Wirkungen von Mg-Düngungs- bzw. -Kalkungsmaßnahmen größtenteils bereits ausführlich beschrieben wurden, werden nachfolgend nur einige neue Befunde diskutiert.

Histologische Befunde

Fink (1983) und Paramesweran et al. (1985) stellten morphologische Veränderungen im Nadelgewebe geschädigter Fichten fest. Diese Symptome wurden zunächst als mögliche Hinweise auf eine Infektion durch phloemspezifische Pathogene (Viren, MLO) gewertet. Durch umfangreiche Pfropfexperimente wurde dieser Verdacht jedoch ausgeräumt (Mehne 1988). Im weiteren war deshalb zu klären, ob die Gewebeschäden direkt durch die Einwirkung von Luftschadstoffen oder indirekt durch andere Faktoren hervorgerufen werden.

Ruetze et al. (1988) und Fink (1988) wiesen Nekrosen im substomatären Mesophyllgewebe älterer Fichtennadeln nach, die mit SO_2 , NO_2 und/oder O_3 begast worden waren. Diese Beobachtungen stimmten mit Befunden überein, wie sie für Nadeln verschiedener Koniferenarten aus Gebieten mit hoher SO_2 - (z. B. Erzgebirge) oder O_3 -Belastung (z. B. San Bernardino Mountains, USA) bekannt sind. Lediglich bei starkem und lang andauerndem SO_2 -Einfluß werden gelegentlich Veränderungen der Phloemzellen im zentralen Leitbündel beobachtet. Im Gegensatz dazu waren gelbspitzige Fichtennadeln grundsätzlich durch Schäden gekennzeichnet, die an den Siebzellen des Phloems ansetzten und in der Regel zu einem vollständigen Kollaps dieses Gewebes führten. Um die Vermutung ernährungsspezifischer Phloemschäden zu verifizieren, wurden Fichtensämlinge zur Induktion von Mg-Mangel in Mg-freier Nährlösung kultiviert (Fink 1997). Bereits am Ende der ersten Vegetationsperiode wiesen die Bäumchen die typische Gelbspitzigkeit auf. Die Nadeln zeigten die gleichen anatomischen Veränderungen, wie sie in gelbspitzigen Nadeln von Freilandfichten gefunden worden waren. Des weiteren waren auch gelbspitzige Nadeln verschiedener Kiefernarten aus Gebieten ohne nennens-

werte Luftschadstoffbelastungen, wie von der Nordinsel Neuseelands oder aus dem finnischen Lappland, durch identische Schädigungen an den Siebzellen charakterisiert. Ähnliche Befunde wurden bei K-Mangelfichten nachgewiesen (z. B. *Picea pungens* in den Adirondacks, USA; Hüttl 1990).

Aus diesen Beobachtungen geht hervor, daß phytotoxische Konzentrationen gasförmiger Luftschadstoffe in Koniferennadeln direkte Schäden setzen. Davon ist primär das Mesophyllgewebe im Bereich der Stomata betroffen. Dagegen führt akuter Mg- (oder K-) Mangel zum Kollaps der Phloemzellen im zentralen Leitbündel der Nadeln. Die histologische Nadelanalyse geschädigter Koniferen ist somit ein brauchbares Diagnoseinstrument, um zwischen direkten und indirekten Schädigungen zu differenzieren.

Fink (1997) konnte weiter zeigen, daß es bei Mg-Entzug aus älteren Nadeln aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeit der Mg-Versorgung und Phloemfunktion zum Erliegen der Funktion dieses Gewebes kommt, wenn ein kritischer Mg-Gehalt unterschritten wird; denn dann kollabieren die Phloemzellen, und es kommt zu keiner weiteren Verlagerung von Nährionen oder Assimilaten über das Phloem. Diese Interaktion erklärt auch die Akkumulation von Assimilaten in Form von Stärke in den Chloroplasten gelbspitziger Nadeln. Fink (1997) fand weiter, daß der Phloemkollaps bei Mg-Mangel oft schon früh einsetzt, so daß nur aus der Nadelspitze viel Mg abtransportiert werden kann. Aufgrund dieses sich rasch einstellenden Phloemkollapses behält die Nadelbasis ihren höheren Mg-Gehalt und bleibt grün. Dieser Mechanismus erklärt das makroskopische Erscheinungsbild des Mg-Mangels (Gelbspitzigkeit) bei Koniferen. Bei K-Mangel kommt es offenbar erst in einem relativ späten Stadium zum Phloemkollaps, nachdem schon größere Mengen von K aus den Nadeln abtransportiert wurden. Dies geht mit einer zum Teil die ganze Nadel erfassenden gleichförmigen Vergilbung mit beginnender Nekrosebildung an der Nadelspitze einher.

Eine interessante Beobachtung machten Hüttl und Fink (1991) bei der Analyse verschieden alter Nadeln von Altfichten eines Düngungsversuches in Süd-Niedersachsen. Im Gegensatz zu den vor mehr als 20 Jahren mit NP- und KMg-gedüngten Bäumen zeigten die Kontrollfichten starke Nadelverluste. Trotz mangelhafter Mg- und schwacher K-Versorgung konnten bei den ungedüngten Bäumen kaum Vergilbungssymptome festgestellt werden. Die mikroskopische Untersuchung ergab für die zwei- bis dreijährigen grünen Nadeln der unbehandelten Fichten deutliche Phloemnekrosen, die gegen Ende der Vegetationsperiode teilweise bereits in den einjährigen Nadeln sichtbar wurden. Bei den gedüngten Bäumen fehlten diese gänzlich. In Übereinstimmung mit den oben beschriebenen Zusammenhängen kam es offensichtlich aufgrund des Mg-Mangels zu einem sehr raschen Phloemkollaps, so daß nur wenig Mg aus den Nadeln verlagert wurde und diese daraufhin mehr oder weniger grün blieben. Dieser Befund stimmt zudem mit den Beobachtungen

von Schmitt et al. (1986) überein, die bei grünen Nadeln geschädigter Fichten mit Mg-Mangel und gleichzeitig schwacher K-Ernährung ebenfalls sehr frühzeitig einsetzende Phloemschäden nachwiesen.

Diese Beobachtungen werfen die Frage auf, unter welchen Bedingungen Mg-Mangel zu einem frühzeitigen Phloemkollaps und damit zum Ausbleiben typischer Vergilbungssymptome führt und wann es zu einem „späten“ Kollaps und damit zur Ausbildung der Gelbspitzigkeit kommt. Nach Fink (1997) sowie Hüttl und Fink (1991) scheinen dabei die Wechselwirkungen mit K eine entscheidende Rolle zu spielen; denn das K-Ion fördert die Retranslokation von Mg in jüngere Nadeln, so daß diese bei guter K-Ernährung auch bessere Mg-Gehalte erreichen können (vgl. Mengel 1980). Beispielsweise sind die Fichten, die montane Vergilbung aufweisen, in der Regel gut mit K ernährt. Diese Bäume sind oft mehrere Jahre gelbspitzig, ohne stärkere Nadelverluste zu zeigen. Demnach können die häufig starken Nadelverluste ohne sichtbare Vergilbungsercheinungen bei Beständen auf Standorten mit schwacher K- und gleichzeitig mangelhafter Mg-Versorgung auf einer Hemmung der Mg-Translokation infolge unzureichender K-Ernährung beruhen. Diese Wechselwirkung könnte – wie im erwähnten Düngungsversuch – die Ursache für grün abfallende Nadeln sein. Derartige Nadelverluste wären dann allerdings als spezifische Mg- (und K-) Mangelsymptome zu verstehen (vgl. Hüttl 1991).

Wie oben demonstriert, lassen sich typische makroskopische Mg-Mangelsymptome durch gezielte Düngung zum Verschwinden bringen. Eine bemerkenswerte Geweberegeneration zeigten Hüttl und Fink (1988) bei vormals gelbspitzigen und nach Mg-Düngung wieder ergrünten Fichten. Bei den vergilbten Nadeln der ungedüngten Fichten fand sich ein vollständiger Kollaps der Siebzellen im Phloem mit einer Hypertrophie der Straßburger- und Kambialzellen. Bei den wiederergrünten Nadeln waren die zwar gestörten, aber noch lebenden Kambialzellen nun offensichtlich in der Lage, sich wiederholt zu teilen und schließlich wieder funktionsfähige Siebzellen auszudifferenzieren. In einem solchen regenerierten Leitbündel deuten dann noch die Bereiche des kollabierten Phloems mit einigen hypertrophierten Straßburger Zellen darin auf die ursprüngliche Schädigung hin. In den Chloroplasten kam es zu einem teilweisen Abtransport der dort als Stärke akkumulierten Zucker. Die sichtbare Revitalisierung der gedüngten Fichten stand demnach im Einklang mit der verbesserten Mg-Ernährung und der damit verbundenen Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der Phloemzellen.

Aus dieser Betrachtung wird ersichtlich, daß Mg- bzw. K-Mangel bei Koniferen neben typischen makroskopischen Symptomen auch spezifische Veränderungen verursacht, die nur mikroskopisch erkennbar sind. Morphologische Nadelschäden können bei Mg-Mangel in Kombination mit schwacher K-Versorgung sehr früh einset-

zen und zum Abwurf grüner Nadeln führen. Die Mg- und/oder K-Mangelschäden im Phloembereich von Koniferennadeln lassen sich durch gezielte Düngung gut regenerieren.

*Einfluß von Mg-Mangel und MgSO₄-Düngung
auf die Feinwurzeln von Nadelbäumen*

Zur Erklärung der neuartigen Waldschäden wurden von Anfang an Wurzelschäden diskutiert (vgl. Gärtner et al. 1989). Die Hydrokulturexperimente von Rost-Siebert (1983) waren neben verschiedenen anderen Beobachtungen und Überlegungen die Grundlage für die oben erläuterte Al-Toxizitätshypothese. Allerdings konnte inzwischen gezeigt werden, daß im Kontext neuartiger Waldschäden eine Al-Toxizität als Ursache für direkte Schäden an mykorrhizierten Wurzeln unter natürlichen Standortbedingungen allem Anschein nach auszuschließen ist (vgl. Hüttl 1993).

Zur Beseitigung von Mg-Mangel wurden in zahlreichen Versuchen rasch wirksame, sulfatische Neutralsalze wie Kieserit erfolgreich eingesetzt. Ulrich (1986) postulierte jedoch, daß reichlich angebotenes Magnesium Al von den Oberflächen der Austauscherelemente in die Bodenlösung bringe und/oder eine erhöhte Mg-Aufnahme zu einer verstärkten Rhizosphärenversauerung führe. Hildebrand (1988) untersuchte mit Hilfe von Modellexperimenten die Ad- und Desorptionsprozesse in verschiedenen Bodenhorizonten nach sulfatischen Neutralsalzdüngungen und vermutete, daß das applizierte SO₄ in sehr sauren basenarmen Böden eine irreversible Versauerung des Unterbodens zugunsten des Oberbodens verursachen könnte. In beiden Fällen sollte der damit verbundene Anstieg der ionaren Al-Konzentrationen Feinwurzeln abtöten und damit Bäume stark schädigen.

Diese Annahme ließ sich durch Freilandversuche mit sulfatischen Düngern nicht verifizieren. Feger et al. (1989) bzw. Feger (1993) zeigten, daß nach Applikation von Kieserit zwar Mg in sauren Waldböden konzentrationsbedingt an den Sorptionskomplexen gegen Protonen, aber auch gegen Al eingetauscht wird (vgl. Liu 1988) und dadurch der pH-Wert der Bodenlösung im Bereich von pH 4 um 0,5 bis 0,8 Einheiten absinkt. Diese pH-Absenkung war jedoch nur von kurzer Dauer und schon nach wenigen Monaten nicht mehr nachweisbar. Nach Zöttl (1990) bewirkt dieser an sich gewünschte Prozeß deshalb keine langfristige irreversible Versauerung des Ober- oder Unterbodens (vgl. Westling und Hultberg 1989). Dieser Versauerungsschub verursachte auch keine Feinwurzel- oder Mykorrhizaschäden (Haug und Oberwinkler 1989). Schneider und Zech (1990) sowie Raspe (1997) konnten nach MgSO₄-Düngung sogar eine Zunahme der Feinwurzelbiomasse bei Fichte in der organischen Auflage wie auch im Mineralboden nachweisen. Auch bei dreijährigen Tannen führte Mg-/Ca-Sulfatdüngung des Substrates der B-Horizonte einer

sauren, Ca- und Mg-armen Podsol-Braunerde im Vergleich zu den unbehandelten Kontrollpflanzen zu einer bemerkenswerten Verbesserung des Feinwurzelwachstums (Gonzales Cascon et al. 1989). Gleiches berichten Fiedler et al. (1988) für die Kiefer.

Für die sulfatische Mg-Düngung ist weiter festzuhalten, daß Mg-Mangelbäume unter bestimmten Standortbedingungen neben Magnesium auch Sulfat in beachtlichen Mengen aufnehmen und zum größten Teil metabolisieren. Dies wurde für Fichte und Buche im Südschwarzwald nachgewiesen (Liu 1988, Jakob 1989, Ende und Zöttl 1990, Feger et al. 1990). Dabei ist jedoch zu beachten, daß erhöhte SO_4 -Aufnahme nach Plass (1983) die Mo-Aufnahme hemmen und so in der Folge den Stickstoffhaushalt verändern kann. Bislang liegen allerdings keine gesicherten Hinweise für diesen Mechanismus bei geschädigten Waldbäumen vor.

Neben der SO_4 -Aufnahme durch die Vegetation sind die organische Festlegung von SO_4 im Solum (Simon et al. 1989), seine Sorption an den Austauschern und die Bildung von Al-Hydroxysulfaten wichtige Prozesse, die bei der Beurteilung des Schicksals von Sulfat im Waldökosystem unbedingt berücksichtigt werden müssen (vgl. Zöttl 1990). Kaupenjohann (1989) wies darauf hin, daß es bei einer Immobilisierung des düngerbegleitenden Anions zu einer bemerkenswerten Speicherung des gedüngten Mg kommt. In Mg-Sorptionsversuchen konnte er zeigen, daß steigende SO_4 -Zugabe die Mg-Konzentration in der Bodenlösung erniedrigte, gleichzeitig aber die Menge sorbierten Magnesiums anstieg. Vergleichbare SO_4 -Adsorptionsisothermen für B-Horizonte podsolierter Böden beschrieb Feger (1993). Neue Einsichten in die Wurzelentwicklung von Mg-Mangelbäumen vermittelten die Untersuchungen von Ericsson (1989). Anhand von Nährlösungsversuchen mit Birken- sowie Fichtensämlingen konnte er zeigen, daß die Muster der Assimilatlokation in die ober- und unterirdische Biomasse durch Nährelementmangel verändert werden. Ob dabei das Wurzelwachstum gefördert wird oder nicht, hängt offensichtlich vom spezifischen Nährelementmangel ab (Abb. 7).

Beispielsweise kommt es bei N- (oder P-) Mangel zu einer deutlichen Begünstigung der C-Allokation in die unterirdische Biomasse und im Vergleich mit optimal ernährten Pflanzen zu einem verstärkten Wurzelwachstum bei deutlich reduziertem Wachstum der oberirdischen Baumteile. Ganz anders ist die Situation bei Mg- (oder K-) Mangel. Da Mg- (bzw. K-) Mangelbäume geringere Kohlenhydratreserven aufweisen und/oder die C-Translokation durch morphologische Veränderungen behindert ist, wird die Assimilatverlagerung in die Wurzeln merklich reduziert, während die oberirdische Biomassebildung, insbesondere das Höhenwachstum, unvermindert anhält. Mg- (oder K-) Mangelpflanzen können deshalb eine schwache Mg- (oder K-) Verfügbarkeit im Substrat nicht durch ein vergrößertes Wurzelsystem kompensieren. Bei schwachem Angebot wird deshalb die Nährionenaufnahmerate infolge der reduzierten Feinwurzelbiomasse ständig zurückgehen. Dies kann schließ-

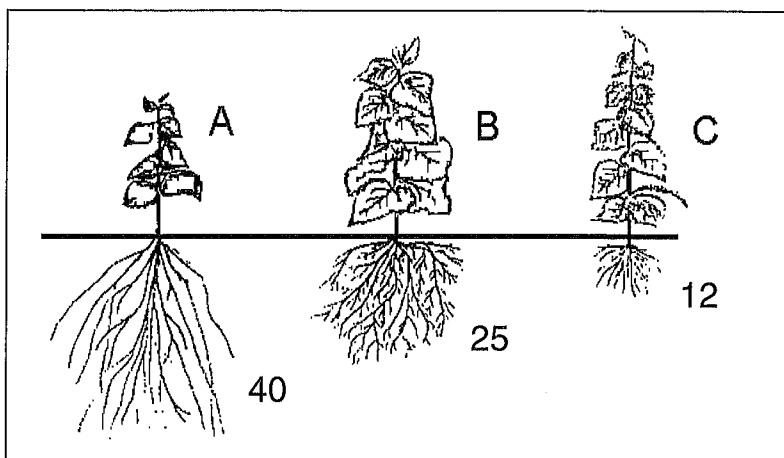


Abbildung 7

Wurzelverteilung und Anteil der unterirdischen Biomasse (%) an der Gesamttrocken-
substanz von Birkensämlingen in Nährlösungskultur bei N-Mangel (A), optimaler Er-
nährung (B) und Mg-Mangel (C) (aus Ericsson 1989).

lich zum Absterben der Bäume führen. Auch dieser ernährungsphysiologisch un-
günstige Mechanismus deutet darauf hin, daß Mg-Mangel für Waldbäume ein in
der Tat neues Phänomen darstellt, an das sie, anders als an N- und P-Mangel, ent-
wicklungsgeschichtlich offensichtlich nicht hinreichend adaptiert sind. Abschlie-
ßend ist anzumerken, daß Raspe (1997) brauchbare Hinweise lieferte, wonach
diese Zusammenhänge nicht nur für Fichtensämlinge, sondern auch für ältere
Fichtenbestände gelten.

*Hinweise zur Wirkungskette des Mg-Mangels
und zu dessen Beseitigung bei Fichte*

Von den verschiedenen Waldschadentypen wurde die montane Vergilbung der
Fichte, die auf Mg-Mangel beruht, am intensivsten untersucht. Die bisherigen Be-
funde lassen folgende Wirkungskette erkennen (vgl. Hüttl und Schaaf 1997):
Boden: Mg-Mangel tritt bei Fichte nur auf sauren basenarmen Böden auf, die sich
aus Mg-armen Ausgangsgesteinen entwickelt haben. Als Mangelgrenzwert für aus-
tauschbares Mg im Feinboden (< 2 mm) des durchwurzelten Solums nennen Liu
und Trüby (1989) $2 \mu\text{eq g}^{-1}$. Sehr hohe Al^{3+} -Konzentrationen im Boden bzw. in
der Bodenlösung können zusätzlich die Mg-Aufnahme behindern. Grenzwerte für

kritische Mg/Al-Verhältnisse wurden bislang nicht angegeben (vgl. Zöttl 1990). Analoges gilt für den NH_4/Mg -Antagonismus. Es existieren keine Hinweise, daß Al oder NH_4 akuten Mg-Mangel unter natürlichen Standortbedingungen induzieren kann, wenn nicht gleichzeitig bodenbürtige Mg-Unterversorgung vorliegt.

Aufnahme: Bei unzureichendem Mg-Angebot ist die Mg-Aufnahme über die Wurzeln reduziert. Zwischen den Mg-Gehalten in der Bodenlösung, im Xylemsaft und in den Nadeln wurden für grüne sowie gelbspitzige Fichten klare Beziehungen nachgewiesen (Oren et al. 1988, vgl. Hüttl et al. 1990). Korrelationen zwischen Mg-Gehalten der Feinwurzeln und Nadeln sind nur dann zu erwarten, wenn die Mg-Gehalte im durchwurzelten Solum kaum differenziert sind (vgl. Murach 1987). Raspe (1997) fand eine positive Korrelation zwischen der Feinwurzelbiomasse und den Mg-Gehalten der Feinwurzeln. Bei der Mg-Aufnahme scheint der Mykorrhiza eine steuernde und regulierende Funktion zuzukommen (Uebel 1982, Leyval und Berthelin 1989).

Pflanzenkörper: Im Baum äußert sich akuter Mg-Mangel neben typischen makroskopischen Symptomen (Gelbspitzigkeit), deren Erscheinungsform unter anderem auf morphologischen Veränderungen beruht (Fink 1997), durch mangelhafte Mg-Spiegelwerte ($< 0,7 \text{ mg g}^{-1}$ T.S.; oberster Quirl) und zunächst erhöhte Mg-Mobilisierung und -Translokation, durch erhöhte Photosensibilität (Schenck 1988, vgl. Marschner und Cakmak 1989, Krause und Prinz 1989, Hüttl 1991), reduzierte Chlorophyll- und Carotinoidgehalte (Beyschlag et al. 1987), veränderte Enzymaktivitäten, die im Zusammenhang mit dem Prozeß der Photooxidation des Chlorophylls stehen (Slovik 1997), und reduzierte Photosynthesekapazität (Mehne 1989). Mg-Nadelgehalte um $0,3 \text{ mg g}^{-1}$ T.S. stellen einen Mangelgrenzwert für die photosynthetische Leistungsfähigkeit der Fichte dar (Beyschlag et al. 1987). In gelbspitzigen Nadeln wird Zucker als Stärke akkumuliert. Dies beruht auf einer Behinderung der Assimilatallokation infolge eines Phloemkollapses der Nadeln (Fink 1997). Diese Befunde erklären das reduzierte Dickenwachstum von Mg-Mangelbäumen. Akuter Mg-Mangel beeinflusst das Wurzelwachstum negativ (vgl. Raspe 1997). Dadurch wird die Mg-Aufnahme zusätzlich verschlechtert. Schließlich vermindert Mg-Mangel die Frostresistenz (Bosch und Rehfuess 1988, Hüttl 1987) und kann das Mg-Kronen-Leaching erhöhen (Krause und Prinz 1989, Schulze 1989). Mg-Mangel kann zum Absterben von Bäumen führen.

Regeneration: Mg-Mangel wird durch eine Verbesserung des Mg-Angebotes im durchwurzelten Solum rasch und nachhaltig behoben. Diese kann natürlich (z. B. durch bessere Wasserversorgung) oder künstlich (z. B. durch Mg-Düngung) verursacht werden. Damit geht eine bemerkenswerte Regeneration der Bäume einher, mit welcher folgende Veränderungen verbunden sind:

- a) Rückgang bzw. Verschwinden der Mangelsymptome einschließlich spezifischer Nadelverluste (z. B. Hüttl 1987);

- b) höhere Mg-Aufnahme über die Wurzeln und erhöhte Mg-Gehalte im Xylemsaft sowie in den Nadeln (z. B. Hüttl et al. 1990, Raspe 1997); verbessertes Feinwurzelnwachstum mit höheren Mg-Gehalten in der Wurzeltrockenmasse (z. B. Zech und Schneider 1988, Raspe 1997);
- c) Zunahme der Chlorophyll- und Carotinoidgehalte sowie der Photosyntheseleistung (Beyschlag et al. 1987, Lange et al. 1989, Slovik 1997);
- d) Regeneration der histologischen Veränderungen und Normalisierung der Assimilatranslokation (Hüttl und Fink 1988, Fink 1997);
- e) Zunahme des Dickenwachstums (z. B. Evers 1984, Makkonen-Spiecker und Spiecker 1997);
- f) Verbesserung der Frostresistenz (Bosch et al. 1986); Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegen Immissionseinflüsse (z. B. Krause und Prinz 1989).

Die nachhaltige Beseitigung des Mg-Mangels ist demnach die entscheidende Voraussetzung, um den Gesundheitszustand und das Wachstum gelbspitziger Fichten langfristig zu verbessern und irreversible Schäden zu vermeiden.

Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Im Zusammenhang mit den sogenannten neuartigen Waldschäden wurden von Anfang an Ernährungsstörungen als symptomatische Befunde diskutiert. Dabei stand vor allem ein neuartiger Mg-Mangel bei Fichtenbeständen in höheren Lagen der Mittelgebirge im Blickpunkt des Interesses.

Die zur Charakterisierung des Ausmaßes sowie der zeitlichen Entwicklung und räumlichen Verteilung der Schäden jährlich in Europa praktizierten Waldschadensinventuren, die im wesentlichen auf der Erfassung unspezifischer Nadel-/Blattverluste basieren, erlauben keine brauchbaren Aussagen über den tatsächlichen Gesundheits- (= Vitalitäts-) Zustand der Bäume/Bestände. Viele der als neu eingestuftten Schadensmerkmale sind seit langem bekannt oder lassen sich mit natürlichen Ursachen erklären. Neu bzw. neuartig sind ausschließlich Schadensphänomene, die auf Ernährungsstörungen beruhen.

Zur optischen Diagnose ernährungsbedingter Waldschäden dienen spezifische Verfärbungssymptome. Diese sind für Mg-Mangel ausführlich beschrieben. Zur exakten Beurteilung des Ernährungszustandes ist die Blattanalyse das Mittel der Wahl. Für zahlreiche Baumarten liegen hinreichend gesicherte Grenzwerte/-bereiche vor. Die mit Ernährungsstörungen (Nährelementmängel, -ungleichgewichte) gekoppelten Waldschäden lassen sich in Abhängigkeit von Standortfaktoren und Bestandesbedingungen in spezifische Schadtypen einteilen. Dabei dominiert der Mg-Mangel bei Fichte auf sauren, basenarmen, aber häufig K-reichen Substraten.

Dieses Syndrom, das optisch seit Mitte der 70er Jahre in höheren Lagen der Mittelgebirge insbesondere an Fichte beobachtet und als Fichten-Hochlagenerkrankung oder montane Vergilbung bezeichnet wird, hat sich aus ernährungskundlicher Sicht allmählich entwickelt. Das relativ „plötzliche“, weitverbreitete Auftreten der sichtbaren Symptome dieser Erkrankung seit Beginn der 80er Jahre läßt sich am ehesten mit extremen Witterungsbedingungen wie den häufigen Trockenperioden Ende der 70er/Anfang der 80er Jahre erklären. Die seit Mitte der 80er Jahre beobachteten Stagnationen im Vergilbungsfortschritt sowie die verbreitete natürliche Regeneration gelbspitziger Fichten fallen mit Jahren günstigerer Niederschlagsverhältnisse zusammen.

In der Regel kommen gesunde Bäume direkt neben kranken Individuen vor. Dieses Phänomen dürfte mit kleinstandörtlichen Unterschieden in der Wasserversorgung und dem Mg-Angebot sowie mit genetischen Unterschieden im Mg-Aufnahmevermögen zusammenhängen. Mg-Mangel tritt bei Fichte nur dann auf, wenn im durchwurzelten Solum Mg-Mangel herrscht. Bei unzureichendem Mg-Angebot können hohe Al^{3+} -Gehalte die Mg-Aufnahme zusätzlich behindern. Mg-Mangel ist vor allem in solchen Waldbeständen anzutreffen, die durch geringe atmogene Mg-Einträge gekennzeichnet sind.

Akuter Mg-Mangel kommt auch in Wäldern vor, die weitgehend frei von anthropogenen Immissionen sind. So hat sich beispielsweise in neuseeländischen *Pinus radiata*-Beständen Mg-Mangel fast zeitgleich mit der Fichten-Hochlagenerkrankung in Zentraleuropa entwickelt. Die Mg-Unterversorgung dieser raschwüchsigen Baumart wurde auf bodenbürtigen Mg-Mangel zurückgeführt. Das Auslösen sichtbarer Symptome konnte auch dort mit extremen Witterungsbedingungen wie Trockenheit in Einklang gebracht werden.

Zur Erklärung der tiefgreifenden Veränderungen des Ernährungszustandes vieler Waldökosysteme mit den Symptomen der neuartigen Waldschäden in Europa und Nordamerika wurden verschiedene Hypothesen formuliert. Diese lassen sich in direkte und indirekte Wirkungspfade einteilen.

Direkte Einwirkungen gasförmiger Luftschadstoffe, wie SO_2 , NO_x , NH_x und O_3 , als Einzelfaktoren oder in Kombination mit additiver bzw. synergistischer Wirkung wurden – mit Ausnahme der sogenannten Rauchschäden – schon früh als primär wirksame Ursachen ausgeschlossen. Da O_3 eine relativ hohe Phytowirksamkeit besitzt, erscheint es jedoch nicht gänzlich unwahrscheinlich, daß diesem Luftschadstoff in bestimmten Gebieten eine mitwirkende Rolle beim Zustandekommen von Walderkrankungen zukommen kann.

Erhöhte H- und NH_4 -Einträge können die Kronenauswaschung mobiler und austauschbarer Nährelemente wie Mg, Ca, K, Zn und Mn mit und ohne Vorschädigung des Blatt-/Nadelgewebes steigern. Es ist daher vorstellbar, daß dieser als Säure-Leaching bezeichnete Mechanismus bei langjähriger Belastung Ernährungsstörun-

gen mit verursacht. Damit ist aber nur dann zu rechnen, wenn die Leaching-Raten längere Zeit über den jährlichen Aufnahme-Raten liegen. Dies dürfte aber nur in Extremfällen auftreten.

Außer Zweifel steht, daß indirekte Wirkungen, d. h. Mechanismen und Prozesse, die zu veränderten Substratbedingungen in Waldökosystemen führen, Ernährungsstörungen auslösen können. In diesem Zusammenhang ist die „Saure Regen“-Hypothese (Bodenversauerung, Al-Toxizität) zu nennen, die von Anfang an kontrovers diskutiert wurde. Es erscheint plausibel, daß aufgrund beschleunigter Bodenversauerung infolge erhöhter anthropogener Säureeinträge und anderer Einflüsse saure basenarme Böden derart an Mg, Ca und/oder K verarmen, daß die aufstokkenden Bestände nicht mehr ausreichend mit diesen Nährstoffen versorgt werden können und akute Mangelsituationen auftreten. Andererseits wurde gezeigt, daß viele Waldbäume tolerant gegen Al-Toxizität sind. Offenbar haben sie sich entwicklungsgeschichtlich gut an saure Substratbedingungen angepaßt und adäquate Schutzstrategien entwickelt. Dies gilt im besonderen Maße für richtig ernährte und mykorrhizierete Bäume. Bislang ließ sich die mit Hilfe von Hydrokulturversuchen für Fichte und Buche postulierte Al-Toxizität unter natürlichen Standortbedingungen nicht bestätigen.

Erhöhte N-Einträge in Waldökosysteme sind ernährungsphysiologisch differenziert zu betrachten. Verbessertes NH_4 -Angebot kann bei Fichte und anderen Baumarten zu reduzierter Mg- und K-Aufnahme sowie zu erniedrigten Rhizosphären-pH-Werten führen, während die Anionenabsorption dadurch gesteigert wird. NO_3 -Ernährung wirkt entgegengesetzt. Bei hohem atmosphärischen N-Input ist zu beachten, daß die N-Aufnahme partiell auch über die Krone erfolgt. In der Regel fördert eine bessere N-Versorgung das Wachstum der Bäume. Daraus können Verdünnungseffekte und Nährelementungleichgewichte resultieren. Hohe N-Einträge können die Bodenversauerung vorantreiben und auf nährstoffarmen Böden eine Verschlechterung des Basenhaushaltes bewirken. Allerdings scheidet die Ammoniumhypothese schon wegen der regional und lokal stark variierenden N-Eintragsraten als „umfassendes“ Erklärungsmodell der weitverbreiteten Ernährungsstörungen aus. Zudem wirken N-Einträge in Waldökosystemen aufgrund der standort- und bestandesspezifischen Unterschiede des N-Haushaltes sehr verschieden. Die zu erwartenden Folgen können sowohl positiv als auch negativ sein.

Die anthropogene Beeinflussung der Atmosphäre und die daraus resultierenden Stoffeinträge sind als Standortfaktor zu bewerten, wobei Veränderungen der Immissionen in Raum und Zeit sowie nach Art, Form, Menge und Verhältnis zu berücksichtigen sind. Es wurde ein Erklärungsansatz formuliert und erfolgreich getestet, in dem die standort- und bestandesspezifischen ernährungsbedingten Waldschäden als Folge verschiedenartiger Kombinationen multipler Streßfaktoren betrachtet werden. Dabei spielt das häufig schwache Nährelementangebot der

Waldstandorte, das durch vielfältige menschliche Einflüsse (Nutzungsgeschichte) mit verursacht wurde, die entscheidende Rolle. Extern verstärkte Bodenversauerung, Verarmung an basischen Kationen, erhöhte N-Einträge, reduzierte Mg- (und Ca-) Deposition, d. h. verringerte Staubeinträge und verstärktes Kronen-Leaching, sind ökosystemare Prozesse, die diese Situation örtlich verschärfen und als mitwirkende Faktoren einzustufen sind.

Extreme Witterungsbedingungen (z. B. Trockenheit) besitzen sowohl auslösenden als auch mitwirkenden Charakter. Biotische Erkrankungen werden als Folgewirkungen eingestuft. Da die Konstellation der Kausalfaktoren in der Regel komplex ist, sich diese Einflüsse zumindest partiell gegenseitig bedingen, verstärken oder auch kompensieren und zudem standortspezifisch sind, können die jeweiligen Schadursachen nur am Standort selbst bestimmt werden. Globale Erklärungsansätze sind deshalb wenig sinnvoll.

Düngungsversuche sind eine klassische Methode, um Ernährungsstörungen in geschädigten Wäldern zu diagnostizieren. Mit der Applikation rasch löslicher Düngemittel läßt sich innerhalb kurzer Zeit prüfen, ob diese Schäden abgemildert oder sogar behoben werden können. In zahlreichen diagnostischen wie auch praxisrelevanten Düngungsversuchen wurde dieser Ansatz erfolgreich getestet. Mittelfristig ist eine Regeneration auch durch die Anwendung Mg-haltiger Kalke möglich.

Reduziertes Feinwurzelwachstum, das bei Nadelbäumen mit Mg- (und K-) Mangel auftritt, beruht wahrscheinlich auf einer veränderten Assimilatallokation. Dies hängt zumindest teilweise mit einem durch Mg- (bzw. K-) Mangel ausgelösten Kollabieren des Phloemgewebes im Leitbündel vergilbter Nadeln zusammen, wodurch die Verlagerung von Zuckern unterbunden wird. Bei Mg- (oder K-) Mangel ist zudem die Photosynthese-Kapazität vermindert. Wird die Mg- (oder K-) Mangelsituation durch gezielte Düngung beseitigt, kommt es zur Regeneration des Phloemgewebes und damit zu einer Normalisierung der C-Allokation aus den wiederergrüntem Nadeln. Dieser bemerkenswerte Effekt erklärt das verbesserte Dicken-, Höhen- und Feinwurzelwachstum gedüngter im Vergleich zu ungedüngten Mg- (oder K-) Mangelbäumen. Die nachhaltige Beseitigung der Mangelsituation ist demnach die entscheidende Voraussetzung, um den Gesundheitszustand und das Wachstum vergilbter Bäume langfristig zu verbessern und irreversible Schäden zu vermeiden. Treten Mg- und K-Mangel bei Koniferen kombiniert auf, bleibt häufig infolge einer sehr früh einsetzenden Schädigung des Nadelgewebes die Ausbildung typischer Mangelsymptome aus, und es kommt zum Abwurf grüner Nadeln (spezifische Nadelverluste).

Heute wie damals wird deshalb neben der Kalkung als Bodenmeliorationsmaßnahme eine an die Standort- und Bestandesbedürfnisse angepaßte gezielte Düngung zur Verbesserung des Ernährungszustandes und der Widerstandskraft der Bäume gegen jegliche Art von Negativeinwirkungen empfohlen. Auch wenn neuerdings

in Zentraleuropa und zum Teil auch in Nordamerika Aspekte des sogenannten Boden- und Gewässerschutzes bei waldbaulichen Maßnahmen wie Kalkungen und Düngungen im Vordergrund stehen, darf das Kompartiment Baum/Bestand aufgrund seiner komplexen Wirkung im Waldökosystem nicht unberücksichtigt bleiben. Denn es wäre ein wenig erfolgversprechender Ansatz, wollte man ein „gesundes“ Waldökosystem einschließlich einer gesunden Hydrosphäre schaffen, ohne den Gesundheitszustand, d. h. den Ernährungszustand, der Bäume zu berücksichtigen.

Da Degradationen von Waldökosystemen häufig auf mehrere Ursachen zurückzuführen sind, werden Sanierungsmaßnahmen in vielen Fällen über Bodenmeliorations- und Düngungsmaßnahmen hinausgehen müssen. Derartige Eingriffe sind daher in ein forstwirtschaftliches Gesamtkonzept einzubinden, in dem neben ernährungs- und bodenkundlichen sowie nutzungsgeschichtlichen Gesichtspunkten auch waldbauliche, ökologische und landschaftspflegerische Ziele zu berücksichtigen sind. Immer aber müssen diese Maßnahmen an die spezifischen Standortbedingungen angepaßt werden und sind deshalb von Fall zu Fall neu zu bestimmen.

Auch wenn sich die Wälder in Deutschland derzeit in einer an sich völlig unerwarteten Gesundungsphase mit bisher unbekanntem Holzzuwachsraten befinden, kann dieser per se positive Befund nicht darüber hinwegtäuschen, daß es sich bei unseren Wäldern weithin um vom Menschen geschaffene Forste handelt, die ständiger forstlicher Pflege bedürfen.

Es ist kaum verständlich, daß die Waldschadenserhebung nach wie vor auf der Grundlage einer wissenschaftlich nicht haltbaren Methode praktiziert und damit der Öffentlichkeit jährlich eine „Waldschadens-Statistik“ vorgelegt wird, die den tatsächlichen Waldzustand nicht realistisch beschreibt. Nach Ellenberg (1996) war und ist die beängstigende Ausdehnung neuartiger Waldschäden in Deutschland und in Europa zu einem beträchtlichen Teil ein Konstrukt, das durch Anwendung einheitlicher Schätzungshilfen auf standörtlich unterschiedlichen Waldflächen und in witterungsmäßig ungleichen Jahren zustande kam bzw. immer wieder kommt.

Erfreulich ist schließlich, daß die seit Anfang der 80er Jahre mit Hilfe zahlreicher Modellberechnungen prognostizierten großflächigen Waldschäden, also das „Waldsterben“ schlechthin, nicht eingetreten und nach Ulrich (1995) in absehbarer Zukunft auch nicht zu erwarten sind.

Literatur

- Aber, J. D., Nadelhoffer, K. J., Steudler, P. & J. M. Melillo (1989): Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience*, 39, S. 378-386.
- Abetz, P. (1987): Forschungsprojekt des Institutes und Erhebung zur Durchforstung. *Forstw. Cbl.*, 106, S. 132-140.
- Abetz, P. (1988): Untersuchungen zum Wachstum von Buchen auf der Schwäbischen Alb. *Allgem. Forst- und J. Tgt.*, 159, S. 215-223.
- Abrahamsen, G. (1980): Impact of atmospheric sulphur deposition on forest ecosystems. In: Shreiner, D., Richmond, C. R. & S. E. Lindberg, *Atmospheric sulphur deposition: environmental impact and health effects*, S. 397-415.
- Adam, K., Evers, F. H. & T. Littek (1987): Ergebnisse niederschlagsanalytischer Untersuchungen in südwestdeutschen Wald-Ökosystemen 1981-1986, *KfK-PEF-Ber.*, 135, S. 8-16.
- Aldinger, E. & W. L. Kremer (1985): Zuwachsuntersuchungen an gesunden und geschädigten Fichten und Tannen auf alten Praxiskalkungsflächen. *Forst. Cbl.*, 104, S. 360-373.
- Aldinger, E. (1983): Gesundheitszustand von Nadelholzbeständen auf gedüngten und ungedüngten Standorten im Buntsandstein-Schwarzwald. *Allgm. Forstz.*, 38, S. 794-796.
- Aldinger, E. (1987): Elementargehalte im Boden und in Nadeln verschieden stark geschädigter Fichten-Tannen-Bestände auf Praxiskalkungsflächen im Buntsandstein-Schwarzwald. *Freiburger Bodenkundl. Abh.*, 19, 266 S.
- Alenäs, I. & L. Skärby (1988): Throughfall of plant nutrients in relation to crown thinning in a Swedish coniferous forest. *Water, Air and Soil Pollut.*, 38, S. 223-237.
- Altenkirch, W. & G. Hartmann (1987): Eichenprobleme. *Forst- u. Holzw.*, 42, S. 445-448.
- Altherr, E. & F. H. Evers (1975): Magnesium-Düngungseffekt in einem Fichtenbestand des Buntsandstein-Odenwaldes. *Allgem. Forst- und J.-Ztg.*, 146, S. 217-226.
- Andersson, F. (1986): Acidic deposition and its effects on the forests of Nordic Europe. *Water, Air, and Soil Pollut.*, 30, S. 17-29.
- Andersson, M. (1988): Toxicity and tolerance of aluminium in vascular plants – a literature review. *Water, Air, and Soil Pollut.*, 39, S. 439-462.
- Arens, K. (1934): Die kutikuläre Exkretion des Laubblattes. *Jahrb. f. B.*, 80, S. 248-300.
- Arndt, U., Seuffert, G. & W. Nobel (1982): Die Beteiligung von Ozon an der Komplexkrankheit der Tanne (*Abies alba* Mill.) – eine prüfenswerte Hypothese. *Staub-Reinhalt. Luft*, 42, S. 243-247.
- Asp, H., Bengtsson, B. & P. Jensen (1988): Growth and cation uptake in spruce (*Picea abies* Karst.) grown in sand culture with various aluminium contents. *Plant and Soil*, 111, S. 127-133.
- Balder, H. & E. Lakenberg (1987): Neuartiges Eichensterben in Berlin. *Allgm. Forstz.*, 42, S. 684-685.
- Balder, H. (1989): Untersuchungen zu neuartigen Absterberscheinungen an Eichen in den Berliner Forsten. *Nachrichtenblatt Dtsch. Pflanzenschutzd.*, 41, S. 1-6.
- Baule, H. & C. Fricker (1967): Die Düngung von Waldbäumen, 259 S.

- Becker, M., Bräker, O.-U., Kenk, G., Schneider, O. & F.-H. Schweingruber (1989): Kronenzustand und Wachstum von Waldbäumen im Dreiländereck Deutschland-Frankreich-Schweiz in den letzten Jahrzehnten. *Allg. Forstz.*, 45, S. 263-274.
- Becker-Dillingen, J. (1939): Die Ernährung des Waldes, 598 S.
- Beese, F. & E. Matzner (1987): Langzeitperspektiven vermehrten Stickstoffeintrages in Wald-Ökosystemen: Droht Eutrophierung? In: Glatzel, G., Möglichkeiten und Grenzen der Sanierung immissionsgeschädigter Wald-Ökosysteme, S. 34-553.
- Beese, F. (1986): Nitrogen cycling in temperate forest ecosystems. *Göttinger Bodenkundl. B.*, 85, S. 194-211.
- Berden, M., Nilsson, S., Rosen, K. & G. Tayler (1987): Soil acidification – extent, causes and consequences. National Swedish Environmental Protection Board, Report 3292, 164 S.
- Bergman, C. (1998): Stickstoff-Umsätze in der Humusaufgabe unterschiedlich immissionsbelasteter Kiefernbestände (*Pinus sylvestris* L.) im nordostdeutschen Tiefland. Cottbuser Schriftenreihe zu Bodenschutz und Rekultivierung (im Druck).
- Bernier, B., Pare, D. & Brazeau (1989): Natural stresses, nutrient imbalances and forest decline in southeastern Quebec. *Water, Air and Soil Pollut.*, 48, S. 239-250.
- Beyschlag, W., Wedler, M., Lange, O. L. & U. Heber (1987): Einfluß einer Magnesiumdüngung auf Photosynthese und Transpiration von Fichten an einem Magnesium-Mangelstandort im Fichtelgebirge. *Allg. Forstz.*, 43, S. 738-741.
- Binkley, D. & P. Reid (1984): Long-term responses of stem growth and leaf area to thinning and fertilization in a Douglas-fir plantation. *Can. J. For. Res.*, 14, S. 656-660.
- Björkman, E. (1942): Über die Bedingungen der Mykorrhizabildung bei Kiefer und Fichte. *Symp. Bot. Uppsal.*, IV., 2, S. 405-412.
- Bolte, A. & W. Beck (1997): Stickstoffsättigung und Destabilisierung von Kieferökosystemen. *Allg. Forstzeitschr.*, 11, S. 2-4.
- Bonneau, M. & G. Landmann (1986): Dépérissement et état nutritionnel des peuplements de sapin pectine et d' épicéa commun dans le Massif Vosgien. Report, INRA, Nancy, Frankreich.
- Bosch, C. & K. E. Rehfuess (1988): Über die Rolle von Frostereignissen bei den „neuartigen“ Waldschäden. *Forstw. Cbl.*, 107, S. 123-130.
- Bosch, C., Pfannkuch, E., Baum, U. & K. E. Rehfuess (1983): Über die Erkrankungen der Fichte (*Picea abies* Karst.) in den Hochlagen des Bayerischen Waldes. *Forstw. Cbl.*, 102, S. 167-181.
- Bosch, C., Pfannkuch, E., Rehfuess, K. E., Runkel, K. H., Schramel, P. & M. Senser (1986): Einfluß einer Düngung mit Magnesium und Calcium, von Ozon und saurem Nebel auf Frosthärte, Ernährungszustand und Biomasse-Produktion junger Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forstw. Cbl.*, 105, S. 218-229.
- Boxman, A. W. & J. G. M. Roelofs (1988): Some effects of nitrate versus ammonium nutrition on the nutrient fluxes in *Pinus sylvestris* seedlings. Effects of mycorrhizal infection. *Can. J. Bot.*, 66, S. 1091-1097.
- Braekke, F. H. (1990): Nutrient accumulation and role of atmospheric deposition in coniferous stands. *Forest Ecology and Management*, 30, S. 351-359.

- Breemen, N. van (1990): Changes in nitrogen losses to groundwater. European workshop on the effect of forest management on the nitrogen-cycle with respect to changing environmental conditions. München, 9.–13. Mai 1990.
- Breemen, N. van, Mulder, J. & C. D. Driscoll (1983): Acidification and alkalization of soils. *Plant and Soil*, 75, S. 283-308.
- Brown, K. A. & D. M. Roberts (1988): Effects of ozone on foliar leaching in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.): confounding factors due to NO_x production during ozone generation. *Environ. Pollut.*, 55, S. 55-73.
- Brüning, D. (1959): Forstdüngung – Ergebnisse älterer und jüngerer Versuche, 210 S.
- Burger, H. (1927): Die Lebensdauer der Fichtennadeln. *Schweiz. Z. Forstwes.*, 78, S. 372-375.
- CEA (Commission of the European Agricultural Association) (1988): Zur Entwicklung der Waldschäden in Europa. *Allg. Forstz.*, 39, S. 1056-1057.
- Cornic, G. (1987): Interaction between sub-lethal pollution by sulphur dioxide and drought stress. The effect on photosynthetic capacity. *Physiol. Plantarum*, 71, S. 115-119.
- Cronan, C. S., Kelly, J. M., Schofield, C. L. & R. A. Goldstein (1987): Aluminium geochemistry and tree toxicity in forests exposed to acidic deposition. In: Berry, R., Harrison, R. M., Bell, J. N. B. & J. N. Lester, Acid rain: scientific and technical advances, S. 649-656.
- Dässler, J.-G. & H. Ranft (1986): Untersuchungen zur komplexen Wirkung von Immissions- und Frosteinfluß auf Fichtenwald in Mittelgebirgslagen. *Allg. Forstz.*, 42, S. 340-343.
- Dijk, H. F. G. van & J. G. M. Roelofs (1988): Effects of excessive ammonium deposition on the nutritional status and condition of pine needles. *Physiol. Plantarum*, 73, S. 494-501.
- Dobertin, M. (1985): Zuwachskundliche Untersuchungen von jungen Fichten mit neuartigen Vergilbungsschadenssymptomen. Diplomarbeit, Forstl. Fak. Göttingen.
- Döhler, H. & R. Aldag (1989): Stickstoffemissionen der Landwirtschaft: Beitrag der Güllewirtschaft. In: Ende, P., Wirkung hoher Stickstoffeinträge auf Waldökosysteme. *Forst u. Holz*, 44, S. 178-180.
- Donaubauer, B. (1988): Milben, Acari, als Ursache von Waldschadenssymptomen. 14th international meeting for specialists in air pollution effects on forest ecosystems. IUFRO Project Group P2.05, Interlaken, Schweiz, 2.–8. Oktober 1988.
- Donaubauer, E. (1987): Auftreten von Krankheiten und Schädlingen der Eiche und ihr Bezug zum Eichensterben. *Österreich. Forstz.*, 98, S. 46-48.
- Dong, P. H. & S. Athari (1989): Ergebnisse der Waldschadensforschung am Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde der Universität Göttingen. *Forst u. Holz*, 44, S. 447-450.
- Ebben, U. (1989): Die toxische Wirkung von Aluminium auf das Wurzelwachstum der Buche. *Allg. Forstz.*, 44, S. 781-783.
- Ebermayer, E. (1876): Die gesamte Lehre der Waldstreu. 300 S.
- Eichkorn, Th. (1986): Wachstumsanalysen an Fichten in Südwestdeutschland. *Allgem. Forst- u. J.-Ztg.*, 157, S. 125-139.

- Eldhuset, T., Göransson, A. & T. Ingestad (1987): Aluminium toxicity in forest tree seedlings. In: Hutchinson, T. C. & K. M. Meema, Effects of atmospheric pollutants on forests, wetlands and agricultural ecosystems. NATO-ASI Series, 16, S. 401-409.
- Ellenberg, H. jr. (1983): Gefährdung wildlebender Pflanzenarten in der Bundesrepublik Deutschland. Forstarchiv, 54, S. 127-133.
- Ellenberg, H. jr. (1985): Veränderungen der Flora Mitteleuropas unter dem Einfluß von Düngung und Immissionen. Schweiz. Z. Forstwes., 136, S. 19-39.
- Ellenberg, H. jr. (1986): Veränderungen von Artenspektren unter dem Einfluß von düngenden Immissionen und ihre Folgen. Allg. Forstz., 42, S. 466-467.
- Ellenberg, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas in den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. 5., stark veränderte und verbesserte Auflage, Stuttgart: Verlag Eugen Ullmer.
- Ende, P. (1990): Wirkung von Mineralsalzdüngern in Fichten- (*Picea abies* (L.) Karst.) und Buchenbeständen (*Fagus sylvatica* L.) des Grundgebirgs-Schwarzwaldes. Diss. Univ. Freiburg.
- Ericsson, T. (1989): Dry matter partitioning in birch seedlings a balance between internal carbon and nitrogen fluxes (Berichtband).
- Evers, F. H. & K. Hausser (1973): Ertrags- und ernährungskundliche Ergebnisse von drei Kulturdüngungsversuchen zu Fichte im Buntsandsteingebiet des Nordschwarzwaldes. Mitt. FVA Baden-Württemberg, H. 54.
- Evers, F. H. & R. F. Hüttl (1990): A new fertilization strategy in declining forests. Water, Air, and Soil Pollut., 54, S. 495-508.
- Evers, F. H. & W. Schöpfer (1988): Darstellung der Ernährungs- und Belastungsverhältnisse der Fichte. Ergebnisse der Belastungsinventur Baden-Württemberg, 1983. Allgem. Forst- u. J.-Ztg., 159, S. 146-154.
- Evers, F. H. (1963): Die Wirkung von Ammonium- und Nitratstickstoff auf Wachstum und Mineralstoffhaushalt von *Picea* und *Populus*. Zeitschrift f. Botanik, 51, S. 61-79, 80-90, 91-111.
- Evers, F. H. (1972): Die jährweisen Fluktuationen der Nährelementkonzentrationen in Fichtennadeln und ihre Bedeutung für die Interpretation nadelanalytischer Befunde. Allgem. Forst- u. J.-Ztg., 143, S. 68-74.
- Evers, F. H. (1984): Welche Erfahrungen liegen bei Kalium- und Magnesium-Großdüngungsversuchen auf verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg vor? Allg. Forstz., 39, S. 767-768.
- Evers, F. H. (1988): Die Düngung und Kalkung, eine Maßnahme zur vorübergehenden Verhinderung von Waldschäden in Baden-Württemberg. Sana Silva Tagungsbericht „Düngung – eine Perspektive für den Schweizer Wald?“, S. 35-49.
- Evers, F. H. (1988): Wasser-, nadel- und bodenanalytische Begleituntersuchungen zu den Versuchen mit oben offenen Kammern und dem Luftmeßprogramm beim Edelmannshof/Welzheimer Wald. KfK-PEF-Ber., 35, Band 1, S. 245-254.
- FBW (Forschungsbeirat Waldschäden/Luftverunreinigungen des Bundes und der Länder) (1986): 2. Bericht, 229 S.

- Feger, K.-H. (1989): Projekt ARINUS: Bilanzierung von Stoffumsatz und -austausch nach Neutralsalzdüngung in bewaldeten Wassereinzugsgebieten. Kali-Briefe (Büntehof), 19, S. 425-441.
- Feger, K.-H. (1997): Biogeochemistry of magnesium in forest ecosystems. In: Hüttl, R. F. & W. Schaaf (eds.), Magnesium deficiency in forest ecosystems. Nutrients in ecosystems, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Feger, K.-H., Zöttl, H. W. & G. Brahmmer (1990): Projekt ARINUS: Auswirkungen der Kieserit-Düngung. 6. Statuskolloquium des PEF, Karlsruhe, 6.-8. März 1990.
- Ferraz, J. B. (1985): Standortbedingungen, Bioelementversorgung und Wuchsleistung von Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.) des Südschwarzwaldes. Freiburger Bodenkundl. Abh., 14, 224 S.
- Fiedler, H. J. (1988): Zur Zinkausstattung der Fichtenökosysteme in Gebieten mit „neuartigen“ Waldschäden. Beitr. Forstwirtschaft., Berlin, 22, S. 61-66.
- Fink, S. (1983): Histologische und histochemische Untersuchungen Nadeln erkrankter Tannen und Fichten im Südschwarzwald. Allg. Forstz., 38, S. 660-663.
- Fink, S. (1987): Anatomie und Histochemie von Koniferen-Nadeln als Diagnosemittel zur Erklärung der Beteiligung biotischer und abiotischer Schadfaktoren beim „Waldsterben“. KfK-PEF-Ber., 12, S. 113-122.
- Fink, S. (1988): Histologische und histochemische Untersuchungen zur Nährstoffdynamik in Waldbäumen im Hinblick auf die „Neuartigen Waldschäden“. 4. Statuskolloquium des PEF, Karlsruhe, 8.-10. März 1988. KfK-PEF-Ber. 35, Bd. 1, S. 209-243.
- Fink, S. (1989): Pathological anatomy of conifer needles subjected to gaseous air pollutants or mineral deficiencies. Aquilo Ser. Bot., 27, S. 1-6.
- Fink, S. (1997): Structural aspects of magnesium deficiency. In: Hüttl, R. F. & W. Schaaf (eds.), Magnesium deficiency in forest ecosystems. Nutrients in ecosystems, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Fischer, H. & V. Konnerth (1989): Temperaturen und Niederschläge in Baden-Württemberg während der letzten 100 Jahre. Allg. Forstz., 44, S. 1317-1318.
- Flückiger, W., Braun, S. & S. Leonardi (1989): Nährstoffentwicklung im Buchenlaub und Auswirkungen auf den Parasitenbefall. Allg. Forstz., 44, S. 772-773.
- Flückiger, W., Flückiger-Keller, H. & S. Braun (1984): Untersuchungen über Waldschäden in der Nordwest-Schweiz. Schweiz. Z. Forstwes., 135, S. 389-444.
- Foerst, K. (1989): Die Düngung als Sanierungs- und Investitionsmaßnahme. Forst u. Holz, 44, S. 83-86.
- Franz, F. & H. Röhle (1985): Zum Wuchsverhalten geschädigter Bäume in Bayern. In: Niesslein, E. & G. Voss, Was wir über das Waldsterben wissen, S. 234-246.
- Galloway, J. H., Dianwu, Z., Jiling, X. & G. R. Likens (1987): Acid rain: China, United States, and a remote area. Science, 236, S. 1559-1562.
- Gärtner, E. J. (1985): Mangan-Gehalte in Altfichten, Boden- und Kronendurchlaß an jeweils gleichen Standorten. VDI-Ber., 560, S. 559-573.
- Gärtner, E. J., Balazs, A. & J. Eichhorn (1989): Waldschäden und Bodenschutz. Forst und Holz, 44, S. 3-5.
- Gehrmann, J. (1984): Einfluß von Bodenversauerung und Kalkung auf die Entwicklung von Buchenverjüngungen im Wald. Diss. Univ. Göttingen.

- Georgii, H.-W. & E. Schmitt (1985): Methoden und Ergebnisse der Nadelanalyse. Staub-Reinhalt. Luft, 45, S. 260-264.
- Gerecke, K.-L. (1986): Zuwachsuntersuchungen an vorherrschenden Tannen aus Baden-Württemberg. Allgem. Forst- u. J.-Ztg., 157, S. 59-68.
- Glatzel, G. (1991): The impact of historic land use and modern forestry on nutrient relations of Central European forest ecosystems. Fer. Res., 27, S. 1-8.
- Glavac, V. (1988): Blatt-Verkleinerungen in immissionsgeschädigten Buchenwäldern. Allg. Forstz., 46, S. 813-814.
- Godbold, D. L., Fritz, E. & A. Hüttermann (1988): Aluminium and forest decline. Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A., 85, S. 3888-3892.
- Godbold, D. L., Schlegel, H. E. & A. Hüttermann (1985): Toxicity of heavy metals to spruce seedlings. In: Lekkas, D. D., heavy metals in the environment. Berichtband 1, S. 500-502.
- Gonzalez-Cascon, M. R., Alcubilla, M. & K. E. Rehfues (1989): Wirkung von Magnesium- und Calcium-Sulfaten und -Karbonaten auf Sproß- und Wurzelentwicklung junger Weißtannen (*Abies alba* Mill.) im Topfversuch mit sauren Böden. Allg. Forst- u. Jagdz., 161, S. 21-28.
- Gorissen, A. & J. A. van Veen (1988): Temporary disturbance of translocation of assimilates in Douglas-firs caused by low levels of ozone and sulphur dioxide. Plant Physiol., 88, S. 559-563.
- Greminger, P. (1988): Ergebnisse der Waldschadensinventur 1988 (Zusammenfassung). In: Sana Silva – Waldschadensbericht 1988, S. 5-6.
- Gruber, F. (1988): Der Fenstereffekt bei Fichte. Forst u. Holz, 43, S. 58-60.
- Grünhage, L. & H.-J. Jäger (1988): Entwicklung der Nährstoff- und Schwermetallgehalte in Fichtennadeln aus dem Rhein-Main-Gebiet. Angew. Bot. 62, S. 65-91.
- Guderian, R. & D. D. Tingey (1987): Notwendigkeit und Ableitung von Grenzwerten für Stickstoffoxide. UBA-Ber., 1/87.
- Guderian, R., Küppers, K. & R. Six (1985): Wirkungen von Ozon, Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid auf Fichte und Pappel bei unterschiedlicher Versorgung mit Magnesium und Calcium sowie auf die Blattflechte *Hypogymnia physodis*. VDI-Ber., 560, S. 657-701.
- Gussone, H.-A. (1984): Empfehlungen zur Kompensationsdüngung. Forst- u. Holzw., 39, S. 154-160.
- Hartmann, G., Blanck, R. & S. Lewark (1989): Eichensterben in Norddeutschland – Verbreitung, Schadbilder, mögliche Ursachen. Forst u. Holz, 44, S. 475-487.
- Hartmann, G., Nienhaus, F. & H. Butin (1988): Farbatlas Waldschäden – Diagnose von Baumkrankheiten. 256 S.
- Hartmann, G., Uebel, R. & R. Stock (1985): Zur Verbreitung der Nadelvergilbung an Fichte im Harz. Forst- u. Holzw., 40, S. 286-292.
- Hasel, K. (1985): Forstgeschichte. Ein Grundriß für Studium und Praxis, 258 S.
- Haug, E. & F. Oberwinkler (1989): Strukturen und Funktionen von Mykorrhizen in Wald-ökosystemen: Dynamik von Mykorrhiza-Populationen auf KMg- und N-Düngungsflächen. KfK-PEF-Ber., 50, S. 67-78.

- Hauhs, M. (1985): Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Langen Bramke (Harz). Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben der Universität Göttingen, 17, 206 S.
- Heinsdorf, D. (1973): Der Einfluß der Jahreswitterung auf den Nährstoffgehalt der Nadeln und das Wachstum ungedüngter Kiefern-Jungwüchse. Beitr. f. d. Forstwirtschaft. Berlin, 2, S. 75-83.
- Heinsdorf, D. (1988): Ergebnisse boden- und nadelanalytischer Untersuchungen in durch Fremdstoffeinflüsse vitalitätsgeminderten Fichten- und Kiefernbeständen und Folgerungen für Düngungsmaßnahmen. Sozialist. Forstw. Berlin, 38, S. 333-335.
- Hildebrand, E. E. (1988): Ionenbilanzen organischer Auflagen nach Neutralsalzdüngung und Kalkung. Forst u. Holz, 43, S. 51-56.
- Hippeli, P. & C. Banse (1992): Veränderungen der Nährelementkonzentration in den Nadeln mittelalter Kiefernbestände auf pleistozänen Sandstandorten Brandenburgs in den Jahren 1964 bis 1988. Forstwiss. Cbl., 111, S. 44-60.
- Hofmann, G., Heinsdorf, D. & H. H. Krauss (1990): Zunehmende Stickstoffeinträge in Kiefern-Beständen als Schadfaktor. Forstw. Berlin, 40, S. 40-44.
- Holstener-Jorgensen, H., Krag, M. & H. C. Olsen (1988): The influence of 12 tree species on the acidification of the upper soil horizons. Det forstlige forsogsvaesen, 62, S. 1-25.
- Hornbeck, J. W., Smith, R. B. & C. A. Federer (1986): Growth decline in red spruce and balsam fir relative to natural processes. Water, Air, and Soil Pollut., 31, S. 425-430.
- Horras, C. (1986): Beziehungen zwischen den Makronährstoffen Magnesium, Calcium, Kalium und Schwefel in Fichtennadeln und Waldschadenssymptomen im Saarland. Diplomarbeit Universität des Saarlandes (Biogeographie), 157 S.
- Hunter, I. R., Prince, J. M., Graham, J. D. & G. M. Nicholson (1986): Growth and nutrition of *Pinus radiata* on rhyolitic tephra as affected by magnesium fertilizer. New Zealand J. Forestry Sci., 16, S. 152-165.
- Husar, R. B. & J. M. Holloway (1983): Sulphur and nitrogen over North America. In: National Swedish Environment Protection Board, Report, 1636, S. 95-115.
- Hüser, R. & K. E. Rehfuess (1988): Stoffdeposition durch Niederschläge in ost- und südbayerischen Waldbeständen. Schriftenreihe d. Forstwiss. Fak. d. Univ. München u. d. Bayer. FVA, 86, 153 S.
- Hüttl, R. F. (1985): „Neuartige“ Waldschäden und Nährelementversorgung von Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.) in Südwestdeutschland. Freiburger Bodenkundl. Abh., 16, 195 S.
- Hüttl, R. F. (1987): Neuartige Waldschäden, Ernährungsstörungen und Düngung. Allg. Forstz., 42, S. 289-299.
- Hüttl, R. F. (1988): Forest decline and nutritional disturbances. In: Cole, D. W. & S. B. Gessel (eds.), Forest site evaluation and long-term productivity, S. 180-186.
- Hüttl, R. F. (1990): Nutrient supply and fertilizer experiments in view of N saturation. Plant and Soil, 128, S. 45-58.
- Hüttl, R. F. (1991): Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika. Habil.-Schrift, Freiburger Bodenkundl. Abh., 28, 440 S.
- Hüttl, R. F. (1993): Forest soil acidification. Angew. Bot., 67, S. 66-75.

- Hüttl, R. F. & S. Fink (1988): Diagnostische Düngungsversuche zur Revitalisierung geschädigter Fichtenbestände (*Picea abies* Karst.) in Südwestdeutschland. Forstw. Cbl., 107, S. 173-183.
- Hüttl, R. F. & S. Fink (1991): Pollution, nutrition and plant function. In: Porter, J. R. & D. W. Lawlor (eds.), Plant growth. Cambridge University Press, Seminar series, 43, S. 207-226.
- Hüttl, R. F. & D. Müller-Dombois (eds.) (1993): Forest decline in the Atlantic and Pacific Region, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 365 S.
- Hüttl, R. F. & M. Frielinghaus (1994): Soil fertility problems – an agriculture and forestry perspective. The science of the total environment, 143, S. 63-74.
- Hüttl, R. F., Bellmann, K. & W. Seiler (eds.) (1995): Atmosphärensanierung und Wald-ökosysteme. Umweltwissenschaften 4, Blottner-Verlag, 238 S.
- Hüttl, R. F. & W. Schaaf (1995): Nutrient supply of forest soils in relation to management and site history. Plant and Soil, 168-169, S. 31-41.
- Hüttl, R. F. & W. Schaaf (eds.) (1997): Magnesium deficiency in forest ecosystems. Nutrients in ecosystems, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 362 S.
- Hüttl, R. F. & K. Bellmann (eds.) (1998): Impact of deposition changes on Scots pine forests – an East-German case study (im Druck).
- Igmandy, C. (1987): Die Welkeepidemie von *Quercus petraea* (Matt.) Lieb. in Ungarn (1978–1986). Österreich. Forstz., 98, S. 48-50.
- Innes, J. L. (1987): The interpretation of international forest health data. In: Perry, R., Harrison, R. M., Bell, J. N. B. & J. N. Lester, Acid rain: scientific and technical advances, S. 633-640.
- Jakob, J.-K. (1989): Elementhaushalt und Biomassenverteilung unterschiedlich gedüngter Jungfichten. Diplomarbeit, Forstwiss. Fak. Univ. Freiburg.
- Johann, K. (1986): Institutsinterner Bericht über die Jahrestagung Sektion Ertragskunde, Mai 1986 in Schwangau.
- Johnson, D. W. & J. O. Reuss (1984): Soil mediated effects of atmospherically deposited sulphur and nitrogen. Phil. Trans. R. Soc. Lond., B., 305, S. 383-392.
- Johnson, D. W. & G. E. Taylor (1989): Role of air pollution in forest decline in eastern North America. Water, Air, and Soil Pollut., 48, S. 21-43.
- Johnson, D. W. (1988): Effects of acid deposition on forest soils. In: Cole, D. W. & S. W. Gessel, Forest site evaluation and long-term productivity, S. 171-179 (Kapitel 17).
- Johnsson, D. W., Lindberg, S. E., Miegroet, H. van, Lovett, G. M., Cole, D. W., Mitchel, M. J. & D. Binkley (1993): Atmospheric deposition, forest nutrient status, and forest decline: Amplications of the integrated forest study. In: Hüttl, R. F. & D. Mueller-Dombois (eds.), Forest decline in the Atlantic and Pacific region. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 365 S.
- Jorns, A. C. & C. Hecht-Buchholz (1985): Aluminium-induzierter Magnesium- und Calciummangel im Laborversuch bei Fichtensämlingen. Allg. Forstz., 41, S. 1248-1252.
- Jorns, A. C. (1988): Aluminium-Toxizität bei Sämlingen der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) in Nährlösungskultur. Ber. d. Forschungszentrum Waldökosysteme/Waldsterben, Reihe A, Bd. 42, S. 1-86.

- Joslin, J. D., McDuffie, C. & P. F. Brewer (1988): Acidic cloud and cation loss from red spruce foliage. *Water, Air, and Soil Pollut.*, 39, S. 355-363.
- Jung, T., Blaschke, H. & P. Neumann (1996): Isolation, identification and pathogenicity of Phytophthora species from declining oak stands. *Eur. J. For. Path.*, 26, S. 253-272.
- Jurat, R. & A. Schaub (1988): Effects of sulphur dioxide and ozone on ion uptake of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) seedlings. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 151, S. 379-384.
- Jurat, R., Schaub, A., Stienen, H. & J. Bauch (1986): Einfluß von Schwefeldioxid auf Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) in verschiedenen Bodensubstraten. *Forstw. Cbl.*, 105, S. 105-115.
- Kandler, O. & W. Miller (1990): Dynamics of „acute yellowing“ of spruce connected with Mg deficiency. *Water, Air, and Soil Pollut.*, 54, S. 21-34.
- Kandler, O. (1985): Immissions-versus-Epidemie-Hypothesen. In: Kortzfleisch, G., Waldschäden: Theorie und Praxis auf der Suche nach Antworten, S. 20-59.
- Kandler, O. (1990): Epidemiological evaluation of the development of „Waldsterben“ in Germany. *Plant Disease*, 74, S. 4-11.
- Kandler, O. & M. Senger (1993): Eichenvergilbung im Raum München: eine Fallstudie. *Rundgespr. der Komm. f. Ökologie*, 5, S. 153-168
- Kandler, O., Miller, W. & R. Ostner (1987): Dynamik der „akuten Vergilbung“ der Fichte. *Allg. Forstz.*, 42, S. 715-723.
- Katzensteiner, K. & G. Glatzel (1997): Causes of magnesium deficiency in forest ecosystems. In: Hüttl, R. F. & W. Schaaf (eds.), *Magnesium deficiency in forest ecosystems*; Kluwer Academic Publishers. *Nutrients in ecosystems*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Kaupenjohann, M. & W. Zech (1986): Walddüngung und neuartige Waldschäden „Ergebnisse aus Düngungs- und Kalkungsversuchen“. In: Glatzel, G., *Möglichkeiten und Grenzen des Ernährungszustandes immissionsgeschädigter Waldökosysteme*. Symposium „Möglichkeiten und Grenzen der Sanierung immissionsgeschädigter Waldökosysteme“, Wien, Österreich, 6.-7. November 1986, S. 82-98.
- Kaupenjohann, M. & W. Zech (1989): Ergebnisse des IMA Querschnittseminars in Bayreuth: Waldschäden und Düngung. *Allg. Forstz.* 37, S. 1002-1008.
- Kaupenjohann, M., Döhler, H. & M. Bauer (1989): Effects of N-immissions on nutrient status and vitality of *Pinus sylvestris* near a hen-house. *Plant and Soil*, 113, S. 179-282.
- Kaupenjohann, M., Hantschel, R., Horn, R. & W. Zech (1987): Ergebnisse von Düngungsversuchen mit Magnesium an vermutlich immissionsgeschädigten Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) im Fichtelgebirge. *Forstw. Cbl.*, 106, S. 78-84.
- Kaupenjohann, M., Schneider, B. U., Hantschel, R., Zech, W. & R. Horn (1988): Sulphuric acid rain treatment of *Picea abies* (L.) Karst. effects on nutrient solution, throughfall chemistry, and tree nutrition. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 151, S. 123-126.
- Keitel, A. & U. Arndt (1983): Ozoninduzierte Turgeszenzverluste bei Tabak (*Nicotiana tabacum* var. Bel. W 3) – ein Hinweis auf schnelle Permeabilitätsveränderungen der Zellmembranen. *Angew. Bot.*, 57, S. 193.
- Keltjens, W. G. & E. van Loenen (1989): Effects of aluminium and mineral nutrition on growth and chemical composition of hydroponically grown seedlings of five different forest tree species. *Plant and Soil*, 119, S. 39-50.

- Kenk, G. & H. Fischer (1988): Evidence from nitrogen fertilization in the forests of Germany. *Environ. Pollut.*, 54, S. 199-218.
- Kenk, G. (1983): Zuwachsuntersuchungen in geschädigten Tannenbeständen in Baden-Württemberg. *Allg. Forstz.*, 38, S. 650-652.
- Kenk, G. (1985): Referenzdaten zum Waldwachstum. Statusseminar Zuwachs und ökonomische Bewertung, 30. Januar 1985, Göttingen.
- Kenk, G., Unfried, P., Evers, F. H. & E. E. Hildebrand (1984): Zur längerfristigen Wirkung von Düngungen auf Zuwachs, Ernährung und Gesundheitszustand in einem Fichtenbestand des Buntsandstein-Odenwaldes. *Mitt. d. Forstl. FVA Baden-Württemberg*, 114.
- Kennel, E. & A. Reitter (1989): Waldschadensinventur Bayern – Ergebnisse 1986 und 1988. Schriftenreihe d. Forstwiss. Fak. d. Univ. München u. d. Bayer. FVA, 94.
- Krause, G. H. M. & B. Prinz, 1989: Experimentelle Untersuchungen der LIS zur Aufklärung möglicher Ursachen der neuartigen Waldschäden. *LIS-Berichte*, 80, 221 S.
- Krause, G. H. M., Arndt, O., Brandt, C. J., Bucher, J., Kenk, G. & E. Matzner (1986): Forest decline in Europe: development and possible causes. *Water, Air, and Soil Pollut.*, 31, S. 647-668.
- Krause, G. H. M., Jung, K. D. & B. Prinz, 1983: Neuere Untersuchungen zur Aufklärung immissionsbedingter Waldschäden. *VDI-Ber.*, 500, S. 257-266.
- Kreutzer, K. & I. Bittersohl (1986): Stoffauswaschung aus Fichtenkronen (*Picea abies* (L.) Karst) durch saure Beregnung. *Forstw. Cbl.*, 105, S. 357-363.
- Kreutzer, K. (1975): Vortrag anlässlich der Tagung der Sektion Waldernährungslehre in Bischofsgrün. In: Kreutzer, K. & J. Bittersohl, Stoffauswaschung aus Fichtenkronen (*Picea abies* (L.) Karst.) durch saure Beregnung. *Forstw. Cbl.*, 105 (1986), S. 357-363.
- Kreutzer, K. (1990): Changes in the degree of nitrogen saturation. European Workshop on the effects of forest management on the nitrogen-cycle with respect to changing environmental conditions. München, 9.–13. Mai 1990.
- Kreutzer, K. (1995): Effects of forest liming on soil processes. *Plant and Soil*, 168-169, S. 447-470.
- Kreutzer, K., Reiter, H., Schierl, R. & A. Göttlein (1989): Effects of acid irrigation and liming in a Norway spruce stand (*Picea abies* (L.) Karst.). *Water, Air, and Soil Pollut.*, 48, S. 111-125.
- Landmann, G., Hunter, I. R. & W. Hendershot (1997): Temporal and spacial development of magnesium deficiency in forest stands in Europe, North America and New Zealand. In: Hüttl, R. F. & W. Schaaf (eds.) *Magnesium deficiency in forest ecosystems. Nutrients in ecosystems*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Lange, O. L., Weikert, R. M., Wedler, M., Gebel, J. & U. Heber (1989): Photosynthese und Nährstoffversorgung von Fichten aus einem Waldschadensgebiet auf basenarmem Untergrund. *Allg. Forstz.*, 44, S. 55-64.
- Lange, O. L., Zellner, H., Gebel, J., Schramel, P., Kostner, B. & F. C. Czygan (1987): Photosynthetic capacity, chloroplast pigments and mineral content of the previous years spruce needles with and without the new flush: analysis of the forest decline phenomenon of needle bleaching. *Oecologia*, 73, S. 351-357.

- Larsen, J. B. (1986): Das Tannensterben: eine neue Hypothese zur Erklärung des Hintergrundes dieser rätselhaften Komplexkrankheit der Weißtanne (*Abies alba* Mill.). Forstw. Cbl., 105, S. 381-396.
- Le Blanc, D. C., Raynal, D. J. & E. H. White (1987): Dendroecological analysis of acidic deposition effects on forest productivity. In: Hutchinson, T. C. & K. M. Meema, Effects of atmospheric pollutants on forests, wetlands and agricultural ecosystems, S. 291-306.
- Lekkerkerk, L. J. A. & S. M. Smeulders (1987): De effecten van ammoniak, ocon en ammoniumsulfaat op Douglas (*Pseudotsuga menziesii*). Report Research Institute for Plant Protection. Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, S. 1-82.
- Leyton, L. (1958): The mineral requirements of forest plants. Handb. Pflanzenphysiologie, Bd. 4: Die mineralische Ernährung der Pflanze, S. 1026-1039.
- Leyval, C. & J. Berthelin (1989): Interactions between *Laccaria laccata*, *Agrobacterium radiobacter* and beech roots: Influence on P, K, Mg, and Fe mobilization from minerals and plant growth. Plant and Soil, 117, S. 103-110.
- Liljelund, L. E. & B. Nihlgard (1988): Nutrient balance in forests affected by air pollution. In: Andersson, F. & T. Persson, Liming as a measure to improve soil and tree conditions in areas affected by air pollution. National Swedish Environmental Protection Board, Report 3518, S. 93-114.
- Liu, J. C. & P. Trüby (1989): Bodenanalytische Diagnose von K- und Mg-Mangel in Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.). Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 152, S. 307-311.
- Liu, J. C. (1988): Ernährungskundliche Auswertung von diagnostischen Düngungsversuchen in Fichtenbeständen (*Picea abies*, Karst.) Südwestdeutschlands. Freiburger Bodenkundl. Abh., 21, 191 S.
- Ma, G. (1988): La pollution atmosphérique et le dépérissement des forêts en Chine. In: Bucher, B. J. & I. Bucher-Wallin (1989), Air pollution and forest decline. 14th international meeting for specialists in air pollution effects on forest ecosystems. IUFRO Project Group P2.05, Interlaken, Schweiz, 2.-8. Oktober 1988, S. 51-54.
- Magel, E. & H. Ziegler (1987): Die „Lametta“-Tracht – ein Schadsymptom? Allg. Forstz., 42, S. 731-733.
- Makkonen-Spiecker, K. & H. Spiecker (1997): Influence of Magnesium supply on tree growth. In: Hüttl, R. F. & W. Schaaf (eds.), Magnesium deficiency in forest ecosystems. Nutrients in ecosystems, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Makkonen-Spiecker, K. (1985): Auswirkungen des Aluminiums auf junge Fichten (*Picea abies* Karst.) verschiedener Provenienzen. Forstw. Cbl., 104, S. 341-353.
- Mälkönen, E. & M. Kukkola (1991): Effect of long-term fertilization on the biomass production and nutrient status of Scots pine stands. Fertilizer Research, 27, S. 113-127.
- Markl, H. (1987): Wissenschaftliche Forschung und ökologische Herausforderungen. Allg. Forstz., 42, S. 554-556, 582-584.
- Marschner, H. & I. Cakmak (1989): High light intensity enhances chloroses and necroses in leaves of zink, potassium, and magnesium deficient bean (*Phaseolus vulgaris*) plants. J. Plant Physiol., 134, S. 308-315.

- Materna, J. (1985): Results of the research into air pollutant's impact on forests in Czechoslovakia. Symposium „Effects of Air Pollution on Forests and Water Ecosystems“. Helsinki, Finnland, 23.–24. April 1985.
- Materna, J. (1987): Waldschäden in der CSSR. Österreich. Forstz., S. 17-19.
- Materna, J. (1989): Site amelioration for the reforestation of degraded land. IUFRO-Symposium „Management of Nutrition in Forests Under Stress“, Freiburg, 18.–21. September 1989.
- Matzner, E. & B. Ulrich (1984): Raten der Deposition, der internen Produktion und des Umsatzes von Protonen in Waldökosystemen. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 147, S. 290-308.
- Matzner, E. (1985): Auswirkungen von Düngung und Kalkung auf den Elementumsatz und die Elementverteilung in zwei Waldökosystemen im Solling. Allg. Forstz., 41, S. 1143-1147.
- Matzner, E. (1987): Der Stoffumsatz zweier Waldökosysteme im Solling. Habil. Schrift., Univ. Göttingen.
- McBride, J. R., Miller, P. R. & R. D. Laven (1985): Air pollutant's effect on forest ecosystems. Acid Rain Foundation, St. Paul, Minn., S. 157-167.
- McKay, H. M. (1988): Non pollutant abiotic factors effecting needle loss. In: Cape, J. N. & P. Mathy, Scientific basis of forest decline symptomatology, S. 31-48.
- Mecklenburg, R. A. (1964): The influence of foliar leaching on plant nutrition with special reference to root uptake translocation and loss of calcium. Diss. Cornell Univ., Ithaca.
- Mehne, B. M. (1988): Vergleichende Untersuchungen an Pflöpfungen mit Reiseren grüner und vergilbter Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) aus Waldschadensgebieten. Diss. Univ. Freiburg.
- Mehne, B. M. (1989): Physiologische Untersuchungen an Fichten mit unterschiedlicher Magnesiumversorgung. Allg. Forstz., 44, S. 1248.
- Mengel, K. (1980): Effect of potassium on the assimilate conduction to storage tissue. Ber. Dtsch. Bot. Ges., 93, S. 353-362.
- Mengel, K., Lutz, H.-J. & M. T. Breininger (1987): Auswaschung von Nährstoffen durch sauren Nebel aus jungen intakten Fichten (*Picea abies*). Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 150, S. 61-68.
- Mengel, K., Högbe, A. & A. Esch (1988): Effect of acidic fog on cuticular waxes, water status, and needle symptoms of *Picea abies*. International Symposium „Acidic Deposition and Decline“, Rochester, U.S.A., 20.–21. Oktober 1988.
- Meyer, F. H. (1985): Einfluß eines Stickstoff-Faktors auf den Mykorrhizabesatz von Fichtensämlingen im Humus einer Waldschadensfläche. Allg. Forstz., 40, S. 208-219.
- Miller, P. R. & A. A. Millecan (1971): Extent of oxidant air pollution damage to some pines and other conifers in California. Plant Dis. Rep., 55, S. 555-559.
- Mies, E. (1987): Elementeinträge in tannenreichen Mischbeständen des Südschwarzwaldes. Freiburger Bodenkundl. Abh., 18, 247 S.
- Mies, E. & H. W. Zöttl (1985): Zeitliche Änderungen der Chlorophyll- und Elementgehalte in den Nadeln eines gelbchlorotischen Fichtenbestandes. Forstw. Cbl., 104, S. 1-8.

- Miles, J. (1985): The pedogenic effects of different species and vegetation types, and the implication of succession. *J. Soil Sci.*, 36, S. 571-584.
- Miller, P. R. (1989): Concept of forest decline in relation to western U.S. forests. In: MacKenzie, J. & M. D. El-Ashry, Air pollutant's toll on forests and crops, S. 75-112.
- Miller, P. R., Parameter, J. R., Flick, B. H. & C. W. Martinez (1969): Ozone dosage response of Ponderosa pine. *Journal Air Pollut. Contr. Assoc.*, 19, S. 435-438.
- Miller, P. R., Bytnerowicz, A., Fenn, M., Poth, M., Tempel, P., Schilling, S., Jones, D., Johnson, D., Chow, J. & J. Watson (1996): Multidisciplinary study of ozone, acid deposition and climate effects on a mixed conifer forest in California, USA. In: Bussotti, F. (ed.), Stress factors and air pollution. 17th international meeting for specialists in air pollution effects on forest ecosystems, Florenz, 14.-19. September 1996 (Berichtband).
- Mohr, H. (1986): Die Erforschung der neuartigen Waldschäden – eine Zwischenbilanz. *Biologie in unserer Zeit*, 16, S. 83-89.
- Morgan, J. V. (1963): The occurrence and mechanism of leaching from foliage by aqueous solutions and the nature of the materials leached. Diss. Cornell Univ., Ithaca, U.S.A.
- Mork, E. (1942): Omstrofallet Ivareskoger. *Medd. Norske Skogforsoksv*, 29, S. 297-365.
- Murach, D. (1987): Effects of soil acidification on root growth in beech (*Fagus sylvatica* L.) and spruce (*Picea abies* Karst.) stands and its possible consequences for shoots. In: Bervaes, J., Mathy, P. & P. Evers (eds.), Relationships between above and below ground influences of air pollutants on forest trees, S. 148-167.
- Neger, F. W. (1908): Das Tannensterben in den sächsischen und anderen deutschen Mittelgebirgen. *Tharandter Forstl. Jbh.*, 58, S. 201-225.
- Nemec, A. (1957): Studien über Rauchschäden an den Waldkulturen in der Umgebung von Papierfabriken. *Sbornik Ceskoslovenske Akademie Zemedelskych Ved Lesnictvi*, 3, S. 33-58.
- Nihlgard, B. (1985): The ammonia hypothesis – an additional explanation of the forest dieback in Europe. *Ambio*, 14, S. 2-8.
- Nilsson, L. O., Hüttl, R. F. & U. D. Johansson (eds.) (1995): Nutrient uptake and cycling in forest ecosystems. *Developments in Plant and Soil Sciences*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 685 S.
- Oden, S. (1968): Nederbördens och luftens förorening – dess orsaker, förlopp och verkan i olika miljöer. *Ekologikomiten, Statens Naturvetenskapliga Forskningsrad, Bul. 1*, Stockholm.
- ÖFBVA (Österreichische Forstliche Bundesversuchsanstalt) (1988): Ergebnisse der Waldzustandsinventur 1988, 10 S.
- Oosterbaan, A. (1987): Eichensterben auch in den Niederlanden. *Allg. Forstz.*, 42, S. 926.
- Oren, R., Schulze, E.-D., Schneider, U., Werk, K. S. & J. Meyer (1988): Carbon assimilation and nutrition of trees in two *Picea abies* (L.) Karst. stands in Bavaria exhibiting apparent decline differences. In: Mathy, P., Air pollution and ecosystems, S. 919-922.
- Owen, T. H. (1954): Observations on the monthly litter fall and nutrient content of Sitka spruce litter. *Forestry*, 27, S. 7-15.

- Parameswaran, N., Fink, S. & W. Liese (1985): Feinstrukturelle Untersuchungen an Nadeln geschädigter Tannen und Fichten aus Waldschadensgebieten im Schwarzwald. *Eur. J. For. Path.*, 15, S. 168-182.
- Peuke, A. D. (1987): Der Effekt von Schwefeldioxid-, Ozon- und Stickstoffdioxid-Begasung auf den Stickstoffmetabolismus steril kultivierter Fichtenkeimlinge (*Picea abies* (L.) Karst.). Diss. Univ. Göttingen.
- Pfarrmann, T. M., Albrecht, U., Kloos, M. & R. Riebeling (1988): Effect of chlorophorm washing on the elemental contents of needles of selected Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from the Taunus mountains (Hessen, FRG) with regard to different needle age classes. 14th international meeting for specialists in air pollution effects on forest ecosystems, IUFRO Project Group P2.05, Interlaken, Schweiz, 2.-8. Oktober 1988, S. 499-502.
- Pfarrmann, T. M., Kloos, M. & H.-D. Payer (1988): Effects of acid mist and ozone on the nutrition status of clonal Norway spruce after fourteen months of treatment in environmental chambers. 14th international meeting for specialists in air pollution effects on forest ecosystems, IUFRO Project Group P2.05, Interlaken, Schweiz, 2.-8. Oktober 1988, S. 503-506.
- Plassard, C. S., Moussain, D. G. & L. B. Salsac (1982): Estimation of mycelial growth of basidiomycetes by means of chitin determination. *Phytochem.*, 21, S. 345-348.
- Praag, H. J. van & F. Weissen (1985): Aluminium effects on spruce and beech seedlings. *Plant and Soil*, 83, S. 331-356.
- Priehäusser, G. (1943): Über Fichtenwurzelfäule, Kronenform und Standort. Beitrag zur Kenntnis der Fichtenrotfäule. *Forstw. Cbl.*, 65, S. 259-273.
- Priehäusser, G. (1958): Die Fichten-Variationen und -Kombinationen des Bayerischen Waldes nach phenotypischen Merkmalen mit Bestimmungsschlüssel. *Forstw. Cbl.*, 77, S. 151-171.
- Prietzel, J., Baur, S. & K.-H. Feger (1989): Al-Fractionen im Bodensickerwasser von Schwarzwaldböden. Berechnung von Löslichkeitsgewichten. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.*, 59/I., S. 453-458.
- Prinz, B., Krause, G. H. M. & H. Stratmann (1982): Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland. *LIS-Ber.*, 28, S. 1-154.
- Pye, J. M. (1988): Impact of ozone on the growth and yield of trees: a review. *J. of Environ. Quality*, 17, S. 347-360.
- Raspe, S. (1997): Fine-root development. In: Hüttl, R. F. & W. Schaaf (eds.), *Magnesium deficiency in forest ecosystems. Nutrients in ecosystems*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Rebel, K. (1924): *Waldbauliches aus Bayern*, II. Bd.
- Reemtsma, J. B. (1986): Der Magnesium-Gehalt von Nadeln niedersächsischer Fichtenbestände und seine Beurteilung. *Allgem. Forst- u. J.-Ztg.*, 157, S. 196-200.
- Rehfuess, K. E. (1983): Walderkrankungen und Immissionen (eine Zwischenbilanz). *Allg. Forstz.*, 38, S. 601-610.
- Rehfuess, K. E. (1983): Ersatztriebe an Fichten. *Allg. Forstz.*, 41, S. 1111.
- Rehfuess, K. B. (1988): Übersicht über die bodenkundliche Forschung im Zusammenhang mit den neuartigen Waldschäden. *KfK-PEF Ber.* 35, Bd. 1, S. 1-26.

- Rehfuess, K. B. (1989): Acidic deposition – extent and impact on forest soils, nutrition, growth and disease phenomena in central Europe: a review. *Water, Air, and Soil Pollut.*, 48, S. 1-20.
- Rehfuess, K. B. & S. Rodenkirchen (1984): Über die Nadelröte-Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in Süddeutschland. *Forstw. Cbl.*, 103, S. 248-262.
- Reich, P. B. & R. G. Amundson (1985): Ambient levels of ozone reduce net photosynthesis in tree and crop species. *Science*, 230, S. 566-570.
- Reisch, W. (1983): Bioelementverteilung in Fichtenökosystemen der Bärhalde (Südschwarzwald). *Freiburger Bodenkundl. Abh.*, 11, 239 S.
- Riebeling, R. & C. Schäfer (1984): Jahres- und Langzeitentwicklung der pH-Werte von Waldböden in hessischen Fichtenbeständen. *Forst- u. Holzw.*, 39, S. 177-182.
- Riebeling, R. (1987): Walddüngung und Bodenschutz – Möglichkeiten und Grenzen. *Jahresber. Hessischer Forstver.*, S. 249-263.
- Roberts, T. M., Skeffington, R. A. & L. W. Blank (1989): Causes of type 1 spruce decline in Europe. *Forestry*, 62, S. 179-222.
- Roelofs, J. G. M., Kempers, A. J., Hondijk, A. L. F. M. & J. Jansen (1985): The effect of air-borne ammonium sulphate on *Pinus nigra* var. *maritima* in the Netherlands. *Plant and Soil*, 84, S. 45-56.
- Röhle, H. (1985): Ertragskundliche Aspekte der Walderkrankungen. *Forstw. Cbl.*, 104, S. 225-242.
- Roloff, A. (1985): Morphologie der Kronenentwicklung von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) unter besonderer Berücksichtigung möglicherweise neuartiger Veränderungen. *Diss. Univ. Göttingen*.
- Roloff, A. (1988): Morphologie der Kronenentwicklung von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) unter besonderer Berücksichtigung neuartiger Veränderungen. II. Strategie der Luftraumeroberung und Veränderungen durch Umwelteinflüsse. *Flora*, 180, S. 297-338.
- Rost-Siebert, K. & G. Jahn (1988): Veränderungen der Waldbödenvegetation während der letzten Jahrzehnte – Eignung zur Bioindikation von Immissionswirkungen? *Forst u. Holz*, 43, S. 75-81.
- Rost-Siebert, K. (1983): Aluminium-Toxizität und -Toleranz an Kleinpflanzen von Fichte (*Picea abies* Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.). *Allg. Forstz.*, 39, S. 686-689.
- Rost-Siebert, K. (1984): Aluminium toxicity in seedlings of Norway spruce and beech. In: Andersson, F. & J. M. Kelly, *Aluminium toxicity to trees – documentation of an international workshop in Uppsala*, 14.–17. Mai 1984, S. 49-70.
- Rothe, G. M., Weil, H., Geider, M., Pfennig, P., Wilhelmi, V. & W. D. Maurer (1988): Nutrient element and carbohydrate status of Norway spruce at Mt. Kleiner Feldberg in Taunus exposed to air pollution and soil acidification. *Eur. J. For. Path.*, 18, S. 98-111.
- Ruetze, M., Schmitt, U., Liese, W. & K. Küppers (1988): Histologische Untersuchungen an Fichtennadeln (*Picea abies* (L.) Karst.) nach Begasung mit SO₂, O₃ und NO₂. *Allgem. Forst- u. J.-Ztg.*, S. 195-203.
- Rühling, A. & G. Tyler (1968): An ecological approach to the lead problem. *Botaniska Notiser*, 121, S. 321-342.

- Runge, M. (1983): Physiology and ecology of nitrogen nutrition. In: Lange, O., *Physiological Plant Ecology III.*, New York: Springer-Verlag.
- Schenck, G. O. (1988): Zur Beteiligung photochemischer Prozesse an den photodynamischen Lichtkrankheiten der Pflanzen und Bäume („Waldsterben“). Rheinisch-Westfälische Akademie d. Wissenschaften. Vorträge, N 360, S. 25-112.
- Scherbatskoy, T. & R. M. Klein (1983): Response of spruce and birch foliage to leaching by acidic mists. *J. Environ. Quality*, 12, S. 189-195.
- Schierl, R. & K. Kreutzer (1990): Effects of liming in a Norway spruce stand (*Picea abies* Karst.). *Fertilizer Research* (im Druck) .
- Schmidt-Vogt, H. (1972): Studien zur morphologischen Stabilität der Fichte – Gesetzmäßigkeiten und Theorien. *Allgem. Forst- u. J.-Ztg.*, 143, S. 221-240.
- Schmidt-Vogt, H. (1983): Nadeljahrgangs-Erhebung zur Beurteilung der Immissionsschäden bei Fichte. *Forst- u. Holzw.*, 38, S. 391.
- Schmitt, U., Liese, W. & M. Ruetze (1986): Ultrastrukturelle Veränderung in grünen Nadeln geschädigter Fichten. *Angew. Bot.*, 60, S. 441-450.
- Schneble, B. (1986): Wachstumsuntersuchungen an 12 Fichten auf Buntsandstein-Standorten des Kleinen Odenwaldes. Diplomarbeit Univ. Freiburg i. Br.
- Schneider, B. U. & W. Zech (1988): The influence of acid rain on fine root distribution and nutrition. In: Mathy, P., *Air pollution and ecosystems*, S. 910-917.
- Schneider, B. U. & W. Zech (1989): The influence of Mg fertilization on growth and mineral contents of fine roots in *Picea abies* (Karst., (L.)) stands at different stages of decline in NE-Bavaria. *Water. Air. and Soil Pollut.* (im Druck).
- Schröder, J. & C. Reuss (1883): Die Beschädigung der Vegetation durch Rauch und die Oberharzer Hüttenrauchschäden. Berlin.
- Schröter, H. (1981): Das Tannensterben in Baden-Württemberg. *Forstw. Cbl.*, 100, S. 161-168.
- Schröter, H. & B. Aldinger (1985): Beurteilung des Gesundheitszustandes von Fichte und Tanne nach der Benadelungsdichte. *Allg. Forstz.*, 40, S. 438-442.
- Schulze, E.-D. (1989): Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) forest. *Science*, 244, S. 776-783.
- Schütt, P. (1977): Das Tannensterben. Der Stand unseres Wissens über eine aktuelle und gefährliche Komplexkrankheit der Weißtanne. *Forstw. Cbl.*, 96, S. 177-186.
- Schweingruber, F. H. (1989): Läßt sich fehlendes Datenmaterial zur Waldschadenssituation anhand von Postkarten ergänzen? *Allg. Forstz.*, 44, S. 266-268.
- Schweingruber, F. H., Joos, K. & O. Weber (1988): Increment studies on trees in areas of Switzerland with potential forest damage. 14th international meeting for specialists in air pollution effects on forest ecosystems. IUFRO Project Group P2.05, Interlaken, Schweiz, 2.–8. Oktober 1988.
- Simmons, G. L. & J. M. Kelly (1989): Effects of acidic precipitation, O₃ and soil Mg status on throughfall, soil and seedling loblolly pine nutrient concentrations. *Water, Air, Soil Pollution*, 43, S. 199-210.
- Simon, B., Feger, K.-H. & H. W. Zöttl (1989): Mikrobielle N- und S-Umsetzung im Auflagehumus und in den oberen Mineralbodenhorizonten von Schwarzwaldböden. *DVWK-Mitt.* 17, S. 157-165.

- Slovik, S. (1997): Tree physiology In: Hüttl, R. F. & W. Schaaf (eds.), Magnesium deficiency in forest ecosystems. Nutrients in ecosystems; Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Spelsberg, G. (1988): Ergebnisse von Nadelanalysen unterstreichen die Notwendigkeit von Waldkalkungen. LÖLF-Ber., 2.
- Spiecker, H. (1987): Düngung, Niederschlag und der jährliche Volumenzuwachs einiger Fichtenbestände Südwestdeutschlands. Allgem. Forst- u. J.-Ztg., 158, S. 70-76.
- Spiecker, H. (1991): Liming, nitrogen and phosphorus fertilization and the annual increment of Norway spruce stands on long-term permanent plots in southwestern Germany. Fertilizer Research, 27, S. 87-93.
- Spiecker, H., Miilikäinen, K., Köhl, M. & J. P. Skovsgaard (1996): Growth trends in European forests, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 372 S.
- Stevens, P. A. (1987): Throughfall chemistry beneath Sitka spruce of four ages in Beddgelert forest, North Wales, U.K. Plant and Soil, 101, S. 291-294.
- Stienen, H. (1985): Struktur und Funktion von Feinwurzeln gesunder und erkrankter Fichten (*Picea abies* Karst.) unter Wald- und Kulturbedingungen. Diss. Univ. Hamburg, 165 S.
- Stienen, H. & J. Bauch (1988): Element content in tissues of spruce seedlings from hydroponic cultures simulating acidification and de-acidification. Plant and Soil, 106, S. 231-238.
- Stock, R. (1988): Aspekte der regionalen Verbreitung „neuartiger Waldschäden“. Forst u. Holz, 43, S. 283-286.
- Strebel, O. (1960): Mineralstoffernährung und Wuchsleistung von Fichtenbeständen (*Picea abies*) in Bayern. Forstw. Cbl., 79, S. 17-42.
- Taylor, O. C., Thomson, P., Tingey, D. D. & R. A. Reinert (1975): Oxides of nitrogen. In: Kozłowski, T. D., Responses of plants to air pollution, S. 121-139.
- Thiel, W. (1988): Was bei Kritik an der Fichte zu beachten ist! Allg. Forstz., 43, S. 757-759.
- Thren, M. (1985): Erste Ergebnisse von Wachstumsanalysen an vorherrschenden und herrschenden Kiefern in Südwestdeutschland. Allgem. Forst- u. J.-Ztg., 156, S. 215-224.
- Tingey, D. D., Wilhour, R. G. & C. Standley (1976): The effect of chronic ozone exposure on the metabolite content of Ponderosa pine seedling. Forest Science, 22, S. 234-241.
- Tomlinson, G. H. (1990): Effects of acid deposition on the forests of Europe and North America. 281 S.
- Trüby, P. & H. W. Zöttl (1988): Schwermetallverteilungen in Waldbäumen geogen unterschiedlich belasteter Standorte. KfK-PEF-Ber., 35, S. 231-243.
- Tuboeuf, E. von (1916): Die Weißpunktkrankheit und ihre Erreger. Naturwiss. Zeitschr. f. Land- u. Forstw., 14. S. 436-446.
- Tukey, H. B. (1970): The leaching of substances from plants. Ann. Rev. Plant Physiol., 21, S. 305-324.
- UBA (Umweltbundesamt) (1988): Daten zur Umwelt 1988/89, 550 S.
- Uebel, E. (1982): Einfluß einer Mineraldüngung auf höhere Pilze und die Mykorrhizabildung auf einer aufgeforsteten Ackerfläche. Arch. Naturschutz u. Landschaftsforsch. Berlin, 22, S. 169-175.

- Ulrich, B. (1972): Forstdüngung und Umweltschutz. *Allg. Forstz.*, 27, S. 147-148.
- Ulrich, B. (1981): Eine ökosystemare Hypothese über die Ursachen des Tannensterbens (*Abies alba* Mill.). *Forstw. Cbl.*, 100, S. 228-236.
- Ulrich, B. (1981): Ökologische Gruppierungen von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 144, S. 289-305.
- Ulrich, B. (1986): Die Rolle der Bodenversauerung beim Waldsterben: langfristige Konsequenzen und forstliche Möglichkeiten. *Forstw. Cbl.*, 105, S. 421-435.
- Ulrich, B. (1995): The history and possible causes of forest decline in Central Europe, with particular attention to the German situation. *Environ. Rev.*, 3, S. 262-276.
- Ulrich, B., Mayer, R. & P. K. Khanna (1979): Die Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. *Schr. Forstl. Fak. d. Univ. Göttingen u. d. Nieders. FVA*, 58, 291 S.
- Verhoeven, W., Herrmann, R., Eiden, R. & Klemm, O. (1987): A comparison of the chemical composition of fog and rain water collected in the Fichtelgebirge, F. R. of Germany, and from the south island of New Zealand. *Theor. Appl. Climatol.*, 38, S. 210-221.
- Wachter, H. (1987): Beobachtungen zur Benadelung in einem Fichtenstangenholz des Eggegebirges 1983-86. *Forst- u. Holzw.*, 42, S. 146-150.
- Waldmann, C. (1985): Zur Anreicherung von Säuren im Baumkronenbereich. *Allgem. Forst- u. J.-Ztg.*, 156, S. 204-210.
- Wehrmann, J. (1959): Methodische Untersuchungen zur Durchführung von Nadelanalysen in Kiefernbeständen. *Forstw. Cbl.*, 78, S. 77-97.
- Wentzel, K.-F. (1958): Feststellung und Bewertung von Waldrauchschäden. *Forschung und Beratung*, 3, S. 109-120.
- Wentzel, K.-F. (1959): Zur Bodenbeeinflussung durch industrielle Luftverunreinigungen und Düngung in Rauchschadenslagen insbesondere mit Kalk. *Forst- u. Holzw.*, 14, S. 6.
- Wentzel, K.-F. (1980): Weißtanne = immissionsempfindlichste einheimische Baumart. *Allg. Forstz.*, 35, S. 373-374.
- Wentzel, K.-F. (1988): Die IUFRO-Grenzwerte 1978 in Bezug zu den neuen Walderkrankungen in Mitteleuropa ab 1980. 14th international meeting for specialists in air pollution effects on forest ecosystems, IUFRO Project Group P2.05, Interlaken, Schweiz, 2.-8. Oktober 1988, S. 367-370.
- Westling, O. & Hultberg, H. (1989): Liming and fertilization of acid forest soils – short-term effects on runoff from small catchments. *Water, Air. and Soil Pollut.* (im Druck).
- Wichtmann, H. & H. Brückner (1989): Waldschäden durch Stickstoffüberschuß oder durch Stickstoffmangel? Die Rolle von Spurenelementen für die Revitalisierung geschädigter Waldökosysteme. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.*, 59/II, S. 811-816.
- Wiedemann, E. (1927): Untersuchungen über das Tannensterben. *Forstw. Cbl.*, 49, S. 759-780, 815-827, 845-853.
- Will, G. M. (1966): Magnesium deficiency: the cause of spring tip chloroses in young pines on pumice soils. *New Zealand J. of Forestry*, 11, S. 88-94.
- Will, G. M. (1985): Nutrient deficiencies and fertilizer use in New Zealand exotic forests. *New Zealand For. Ser., FRI Bulletin* 97, 53 S.

- Winkler, P. (1982): Zur Trendentwicklung der pH-Werte des Niederschlags in Mitteleuropa. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 145, S. 576-585.
- Wisniewski, J. (1982): The potential acidity associated with dews, frosts and fogs. *Water, Air and Soil Pollut.*, 17, S. 361-377.
- Wittich, W. (1958): Auswertung eines forstlichen Düngungsversuches auf einem Standort mit für weite Gebiete Deutschlands typischem Nährstoffhaushalt. Ruhr-Stickstoff AG, Bochum, S. 1-48.
- Zech, W. & E. Popp (1983): Magnesiummangel, einer der Gründe für das Fichten- und Tannensterben in NO-Bayern. *Forstw. Cbl.*, 102, S. 50-55.
- Zöttl, H. W. (1960): Die Mineralstickstoffanlieferung in Fichten- und Kiefernbeständen Bayerns. *Forstw. Cbl.*, 79, S. 221-236.
- Zöttl, H. W. (1973): Diagnosis of nutritional disturbances in forest stands. *FAO-IUFRO Symposium on forest fertilization*, Paris, S. 75-95.
- Zöttl, H. W. (1985): Waldschäden und Nährelementversorgung. *Düsseldorfer Geobotanisches Kolloquium*, 2, S. 31-41.
- Zöttl, H. W. (1987): Stoffumsätze in Ökosystemen des Schwarzwaldes. *Forstw. Cbl.*, 106, S. 105-114.
- Zöttl, H. W. (1990): Ernährung und Düngung der Fichte. *Forstw. Cbl.*, 109, S. 130-137.
- Zöttl, H. W., Stahr, K. & K. Keilen (1977): Spurenelementverteilung in einer Bodengesellschaft im Bärhalde-Granit (Südschwarzwald). *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.*, 25, S. 143-148.
- Zöttl, H. W. & E. Mies (1983): Nährelementversorgung und Schadstoffbelastung von Fichtenökosystemen im Südschwarzwald unter Immissionseinfluß. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges.*, 38, S. 429-434.
- Zöttl, H. W. & R. F. Hüttl (1985): Schadsymptome und Ernährungszustand von Fichtenbeständen im südwestdeutschen Alpenvorland. *Allg. Forstz.*, 40, S. 197-199.
- Zöttl, H. W. & R. F. Hüttl (1986): Nutrient supply and forest decline in southwest Germany. *Water, Air, and Soil Pollut.*, 31, S. 257-265.
- Zöttl, H. W., Hüttl, R. F., Fink, S., Tomlinson, G. H. & J. Wisniewski (1989): Nutritional disturbances and histological changes in declining forests. *Water, Air, and Soil Pollut.*, 48, S. 87-109.

*Einführung zur Akademievorlesung
von Günter Spur am 11. Dezember 1997*

Dieter Simon

Präsident der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften

*„Und doch ist nichts so flüchtig, das nicht eine
Spur, das nicht seinesgleichen zurücklasse.“
(Goethe, Wahlverwandtschaften).*

Meine Damen und Herren,

Günter Spur ist Professor emeritus am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin, er war langjähriger Leiter des Berliner Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik und ist Gründungsmitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften.

Äußerlichkeiten: Spur wurde 1928 in Braunschweig geboren und studierte von 1948–1954 an der Technischen Hochschule seiner Heimatstadt Maschinenbau, und zwar in der Fachrichtung Fertigungstechnik. Nach seiner ersten beruflichen Tätigkeit als Konstrukteur arbeitete er von 1956–1961 zunächst als Wissenschaftlicher Assistent, dann als Oberingenieur und Leiter des Versuchsfeldes am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TH Braunschweig. 1960 wurde er zum Dr.-Ing. promoviert; von 1962–1965 war er in einer Bielefelder Werkzeugmaschinenfabrik als Konstruktionsleiter und Konstruktionsdirektor tätig.

Seit mehr als dreißig Jahren, nämlich seit seiner Berufung zum Professor für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik und Direktor des traditionsreichen Instituts für Werkzeugmaschinen an der Technischen Universität Berlin im Jahre 1965, ist diese Stadt sein zentrales Wirkungsfeld.

Wiederholt hatte er ein Institut für Produktionstechnik gefordert, das angewandte Forschung und Entwicklung für Wirtschaft und öffentliche Auftraggeber betreiben sollte: 1976 wurde dann schließlich das Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik gegründet und Günter Spur zu seinem Leiter bestellt. Wie so oft hatte die Idee denjenigen, der sie formulierte, eingeholt.

Auf der Basis einer Kooperationsvereinbarung wurden das Fraunhofer-Institut und das Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der TU Berlin 1986 unter dem Dach des Produktionstechnischen Zentrums in Berlin-Charlottenburg räumlich vereint. Es entstand jener prachtvolle Bau, den man bei entsprechend geführter Fahrt zum Flughafen von außen bewundern kann. Ob man da auch 'rein darf ...? In enger Zusammenarbeit mit der Wirtschaft werden im Produktionstechnischen Zentrum neue Technologien entwickelt – besonderes Augenmerk gilt dabei der Dienstleistungsorientierung von Forschung, Lehre und Entwicklung sowie der Förderung des technologischen Wettbewerbs in der Region Berlin-Brandenburg. Also *per definitionem* ein Lieblingskind der Industrie. Der Technologietransfer bezieht sich nicht nur auf die Weitergabe von Forschungsergebnissen, sondern strebt gezielt Firmenneugründungen an – bislang kann das Doppelinstitut auf rund dreißig Eigen Gründungen ehemaliger Mitarbeiter zurückblicken.

Zu Spurs Hauptarbeitsgebieten gehören die Konstruktions- und Fertigungstechnik; exemplarisch für seine Verdienste um die Automatisierungstechnik sind u. a. flexible Fertigungssysteme sowie, auf dem Gebiet der Industrierobotertechnik, neue Steuerungen. Seine Forschungsarbeiten über das Management des modernen Fabrikbetriebs trugen zur Verbesserung der industriellen Produktion bei. Zahlreiche Diplomanden und Doktoranden zählen zu seinen Schülern.

Spur ist langjähriges Mitglied zahlreicher Institutionen und Gremien, u.a. ist er Kurator der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig und Berlin, Mitglied der Internationalen Forschungsgemeinschaft für Produktionstechnik Paris und der Fraunhofer-Gesellschaft sowie wissenschaftlicher Rat der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen. Er war Präsidialmitglied des Deutschen Instituts für Normung (DIN) (1973–1979) und Senator der Deutschen Forschungsgemeinschaft (1979–1984). 1989 wurde er als Auswärtiges Mitglied in die Akademie der Wissenschaften der DDR gewählt. Er ist – dies sei nur auszugsweise genannt – Foreign Associate Member der amerikanischen National Academy of Engineering, auswärtiges Mitglied der Königlich Schwedischen Akademie für Ingenieurwissenschaften und der britischen Royal Academy of Engineering sowie Honorary Member der Society of Manufacturing Engineers Detroit. Er ist Ehrendoktor der Universitäten Löwen, Chemnitz, Prag, Moskau, Peking und Cottbus; die Tongji-Universität Schanghai verlieh ihm 1994 die Ehrenprofessur. Ehrungen zuhauf: eine sei hervorgehoben, nämlich die Grashof-Denk Münze, die ihm 1991 verliehene höchste Auszeichnung des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI). Spur ist neben zahlreichen fachspezifischen Publikationen auch Autor einer kulturgeschichtlichen Betrachtung der Fertigungstechnik, Herausgeber der *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* und des mehrbändigen *Handbuchs der Fertigungstechnik*, eines Standardwerks, das für Ingenieure und Techniker in Beruf und Ausbildung den Stand und die Entwicklung technologischer Produktionsprozesse

in einer Kombination von Grundlagenwissen und praxisorientierten Fachbeiträgen systematisch und umfassend dokumentiert.

Man fragt sich? Wie macht man eine solche Karriere? Wie muß man da sein – was für ein Kerl steckt hinter dieser Vita?

Zunächst ein großer Manager. Man hat den Eindruck, er hat jeden Tag seines Lebens mit dem Altberliner Spruch begonnen: „Lebenslauf, ick erwarte Dir!“

Belege für das Wissenschafts-Managertum. Erster Beleg: die Westberliner Akademie. 1987 wurde er Gründungs- und Vorstandsmitglied der zu seinem Kummer kurzlebigen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, der Westberliner Arbeitsakademie, deren Hinwendung zum technikwissenschaftlichen Bereich in ihrer englischen Bezeichnung *The Academy of Sciences and Technology in Berlin* explizit zum Ausdruck kam. An dieser Akademie gehörte er der Arbeitsgruppe „Automatisierung, Arbeitswelt und künftige Gesellschaft“ an.

Zweiter Beleg: die Brandenburgische Technische Universität Cottbus. 1991 wurde Spur zum Gründungsrektor der Technischen Universität Cottbus gewählt, die neben Potsdam und der Viadrina in Frankfurt/Oder zu den zunächst nicht unumstrittenen Universitätsneugründungen in Brandenburg gehört. Die integrierten und interdisziplinären Studiengänge dieser sich als Reformuniversität verstehenden Hochschule vermitteln angehenden Ingenieuren und Technikwissenschaftlern zugleich auch kultur- und sozialwissenschaftliches Spezialwissen. Orientierung am industriellen Umfeld und die Verbindung von systematischer Grundlagenforschung und angewandter Forschung gehören ebenfalls zu den Spezifika der TU Cottbus. Dritter Beleg: die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Günter Spur war Mitglied der vom Senat Anfang 1991 eingesetzten sogenannten „Planungsgruppe“, die das Konzept für eine neu zu konstituierende Akademie der Wissenschaften in Berlin zu erarbeiten hatte. 1993 gehörte er dann auch zu den Gründungsmitgliedern der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, deren Technikwissenschaftlicher Klasse er bis 1996 als Sekretar vorstand. Darüber hinaus initiierte er – zusammen mit anderen – den Förderkreis der Akademie. Spur wurde 1994 Sprecher der Arbeitsgruppe „Optionen zukünftiger industrieller Produktionssysteme“, eine der ersten von der Akademie eingesetzten interdisziplinären Arbeitsgruppen. Diese vor kurzem zum Abschluß gekommene Arbeitsgruppe führte Wissenschaftler der Produktionswissenschaft, der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften, der Wirtschaftshistorik, der Elektrotechnik sowie der Energie- und Verfahrenstechnik zusammen. Ihre Ergebnisse sind nun in der Reihe *Forschungsberichte der Interdisziplinären Arbeitsgruppen der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften* erschienen und wurden heute morgen im Rahmen einer Pressekonferenz vorgestellt.

Vierter und letzter Beleg: der *Konvent für Technikwissenschaften*. Bereits in der Zeit unmittelbar nach der Konstituierung der Berlin-Brandenburgischen Akademie

der Wissenschaften wies Spur nachdrücklich auf die Notwendigkeit einer adäquaten Vertretung für die deutschen Ingenieure hin, die vor allem in der Berliner (hier mit eigener Klasse), der Düsseldorfer sowie der Leipziger Akademie repräsentiert sind – in anderen europäischen Staaten existieren demgegenüber schon seit langem entsprechende nationale Einrichtungen. 1995 formulierte er die zentralen Leitideen für eine zu konstituierende Akademie – später einen Konvent der Technikwissenschaften, der neben Entscheidungsträgern aus der Wissenschaft auch solche aus der Wirtschaft aufnehmen soll. Vor wenigen Wochen wurde auf eine Initiative der Nordrhein-Westfälischen Akademie der Wissenschaften und der BBAW – die damit auf die Ablehnung der Konferenz der deutschen Akademien der Wissenschaften sich für den Konvent zu engagieren, reagierten – der *Konvent für Technikwissenschaften* gegründet. Günter Spur wurde zu seinem Vorsitzenden gewählt. Diese Arbeitsgemeinschaft wird zukünftig die deutschen Technikwissenschaftler auf nationaler wie auch auf internationaler Ebene vertreten.

Ich schätze es nicht sonderlich, wenn man mit den Namen der Menschen Scherze macht. Also, wenn jemand Kaser oder Käsle heißt und an diesen Umstand Bemerkungen über das Opus der Betroffenen angeknüpft werden. Aber hier kann man sich dies einmal erlauben. Wo auch immer Günter Spur tätig war, hat er tiefe Spuren hinterlassen. Welchem Gremium auch immer er angehörte, stets ist er nachhaltig prägend gewesen. Ich kenne Herrn Spur noch nicht sehr lange, aber ich habe mich immer gefragt, wie das kommt. Denn er sieht doch eigentlich gar nicht so aus. Und mit der Feststellung, er sei ein bedeutender Manager ist überhaupt noch nichts gesagt. Gewiß ist er dynamisch und engagiert, aber das reicht nicht. Vorbehaltlich einer besseren Analyse bei geeigneterer Gelegenheit würde ich heute nur dies sagen: eine singuläre Mischung aus nonchalanter Dickköpfigkeit, charmanter Hartnäckigkeit und scheinbescheidener Blauäugigkeit in der Zielsetzung und geschickten Verfolgung seiner Interessen.

Die Akzeptanz und Wertschätzung von Technik und Technikwissenschaft ist in der deutschen Gesellschaft – und dies ist eher ein Erbe der „alten“ Bundesrepublik – nach wie vor problematisch: „Ingenieure sind“, wie Günter Spur selbst einmal lakonisch feststellte, „zwar notwendig, aber nicht beliebt. Die wirkliche Arbeitsleistung, die Ingenieure vollbringen [...], also die Leistung derjenigen, die ein Werk vor Ort führen, die eine Fabrik in Gang halten, verschwindet im öffentlichen Bewußtsein. Niemand nimmt das mit großem Interesse zur Kenntnis. [...] mir fällt auf, daß [in der DDR] die technische Leistung einen ganz anderen Stellenwert hat“. Diese Grundtendenz scheint sich – wie jüngst durch einen Artikel in der *Zeit* bestätigt wurde, im wiedervereinigten Deutschland durchgesetzt zu haben: „Technik fasziniert nicht mehr. Wer sich in Gesellschaft für eine neue Werkzeugmaschine begeistern kann, wird als großer Junge oder hintersinniger Witzbold

belächelt. [...] Technik steht grundsätzlich unter Soupçon, bei den Gebildeten sogar mehr als bei den Ungebildeten.“

Technik sucht heute indes ebenso ganz bewußt den Dialog mit Geistes- und Sozialwissenschaften und geht über die Einbettung in die ihr naheliegenden Natur- und Wirtschaftswissenschaften weit hinaus – ja, die Ingenieurwissenschaften sind geradezu „verpflichtet“ (Spur), den technologischen Wandel der Arbeitswelt zu erklären und können damit – möglicherweise – auch einen Beitrag zu einem verbesserten Verständnis ihrer selbst leisten.

Günter Spur

Thesen zum Selbstverständnis der Technikwissenschaft

(Akademievorlesung am 11. Dezember 1997)

Technik als wissenschaftsorientiertes Kulturpotential

Technik ist ein Teil der kulturellen Entwicklung des Menschen. Auf Wandel und Fortschritt ausgerichtet, bewirkt Technik eine permanente Reform unserer Lebensgestaltung. Entstanden ist ein großes Menschenwerk als künstliche Hilfswelt zur Natur. Mit Technik reagiert der Mensch auf die Natur auch zur Erhaltung des ökologischen Gleichgewichts.

Technik wirkt auf die Entwicklung unserer Gesellschaft produktiv durch schöpferisches Gestalten. Wir sprechen von den „Nützlichen Künsten“ und preisen die Kunstfertigkeit des Menschen.

Technik ist zweckbestimmt, entwickelt sich aber nach eigenen, nicht immer erkennbaren Gesetzen. Technischer Fortschritt ist kreativ, beruht auf Empfindung und Eingebung, auf Vernunft und Bewußtsein, auf Wissen und Können, aber auch auf Entscheidungsfähigkeit und Handlungsvermögen. Art und Schnelligkeit der kreativen Entfaltung werden von der Realität des Gegenwärtigen, auch von der Modernität des Zeitgeistes beeinflusst.

Wissenschaft, Kunst und Technik prägen das Bild unserer Kultur. Technik verkörpert sich darin nicht nur durch gegenständliche Realität, sondern wirkt auch durch soziotechnisch integrierte Handlungsprozesse als kulturelles Korrektiv auf die gesellschaftliche Entwicklung.

Die Technik der Zukunft strukturiert sich zunehmend wissenschaftsbestimmt. Tiefgreifende Wirtschaftsimpulse werden durch Innovationsschübe aus einer fachübergreifenden Wechselwirkung mit anderen Wissenschaften ausgelöst. Technik sieht sich durch die fächerartige Ausstrahlung auf alle Bereiche der Gesellschaft zunehmend in gesellschaftswissenschaftliche Fragestellungen eingebunden. In diesem Sinne nähern sich die Technikwissenschaften den Disziplinen der Sozialwissenschaften.

Transparenz schafft Vertrauen zur Technik

Technik entsteht durch Denken, Planen und Bauen. Während sich das Gedachte noch frei entwickeln kann, wird das Planen schon normativ beeinflusst. Das Geplante kann dann nicht gebaut werden, wenn gesellschaftliche Restriktionen dies verhindern. Ohne das Gebaute macht Technik allerdings keinen Sinn, denn die angestrebte Zweckerfüllung setzt praktische Wirksamkeit voraus.

Doch wer Technik gestaltet, muß mit dem Risiko des Irrtums leben, mindestens mit der kalkulierten Fehlermöglichkeit. Die damit verbundene Übernahme von Verantwortung wird um so bedeutsamer, je stärker Technik in die Welt des Menschen eingreift. Es ist verhältnismäßig einfach, technische Mängel im Detail zu beheben, jedoch viel schwieriger oder vielleicht überhaupt nicht möglich, das ganzheitliche Risiko komplexer technischer Entwicklungsprozesse als Produkt unseres kulturellen Fortschritts zu kalkulieren. Heidegger ist extrem skeptisch, wenn er zweifelnd proklamiert, daß Technik in ihrem Wesen etwas ist, das der Mensch von sich aus nicht bewältigt.

In den letzten Jahrzehnten ist die Kritik an der Technik gewachsen. Aus dem Nichtverstehen der Entstehungsbedingungen technischer Produkte und Leistungen wachsen Irritationen. Ohne ausreichende technische Bildung ist der Mensch überfordert, den raschen technischen Wandel zu verstehen. Das Bedürfnis nach einer vertrauten, sicheren und stabilen Lebensumgebung aktiviert bei Verunsicherung schnell politische Potentiale.

Technik ist ein bestimmender Antrieb unserer Zeit und damit auch eine Herausforderung zur Auseinandersetzung. Arnold Gehlen verweist darauf, „daß der in Deutschland seit Nietzsche und Spengler üppig blühenden kulturkritischen Literatur selten eine gegen Technik gerichtete polemische Tönung fehlt“. Die Gründe für diesen Widerstand gegen eine kulturelle Gleichberechtigung der Technik erscheinen ihm dunkel, wenn er meint, „daß da alte ständische Vorstellungen von der Überlegenheit der kontemplativen Wissenschaften über die Praxis, der reinen Wissenschaften über die angewandten, eine Rolle spielen“. Nach nunmehr vierzig Jahren kann man jedoch von einem Fortschritt sprechen. So unterstreicht Zimmerli nachdrücklich die Integration von Technik und Wissenschaft in die kulturelle Entwicklung. Er geht dabei ausdrücklich über die „vorsichtige Konjunktion Kultur und Technik“ hinaus und postuliert „Technik als Kultur“.

Technik darf allerdings unsere kulturelle Entwicklung nicht instabilisieren. In diesem Zusammenhang erhalten Bildung, Wissenschaft und Politik in ihrer normativen Funktion eine zunehmende Bedeutung. Solche Überlegungen zielen auf Vertrauensbildung durch Transparenz und Aufklärung: die, die es machen, müssen es jenen sagen, die es betrifft. Technischer Fortschritt muß angemessen dosiert sein, damit

die gesellschaftlichen Strukturen den zunehmenden technologischen Innovationsdruck verkräften und verarbeiten können.

Technik hat das Sachpotential der Lebenswelt verändert, hat eine eigenständige Arbeitswelt bewirkt. Das steigende Interesse der Öffentlichkeit an der Gestaltung dieser Welten führt zu einem hohen Erwartungsdruck gegenüber der technischen Entwicklung und Forschung. Die daran Beteiligten werden zunehmend nach der gesellschaftlichen Verantwortung ihres Handelns gefragt. Das trifft besonders die Arbeitswelt des Menschen, die bei hoher technologischer Produktivität von massiver Arbeitslosigkeit begleitet wird. In dem Maße, wie der technische Fortschritt unsere Lebenswelt sozial beeinflusst, ist es notwendig, die gesellschaftlichen Reaktionen auf diesen Wandlungsprozeß zu beachten. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei den informationsorientierten Zukunftstechnologien. Sie bedürfen dringend einer vorbereitenden Interpretation, die zu neuen Berufsbildern führt.

Technik steht nicht nur unter dem Zwang ökonomischer Präferenzsysteme, sondern auch unter dem Druck ökologischer Folgenbewertung. Die Wirkpotentiale der Technik richten sich zunächst und noch immer auf Ernährung, Kleidung, Wohnen und Gesundheit, auf Schutz vor Unbilden der Natur, schließlich aber auch auf die Mehrung von Freizeit und Erholung sowie auf die Möglichkeit, den kulturellen Erlebniskreis zu erweitern. Hierbei gewinnen Bildung und Wissen immer mehr an Bedeutung (Abb. 1).

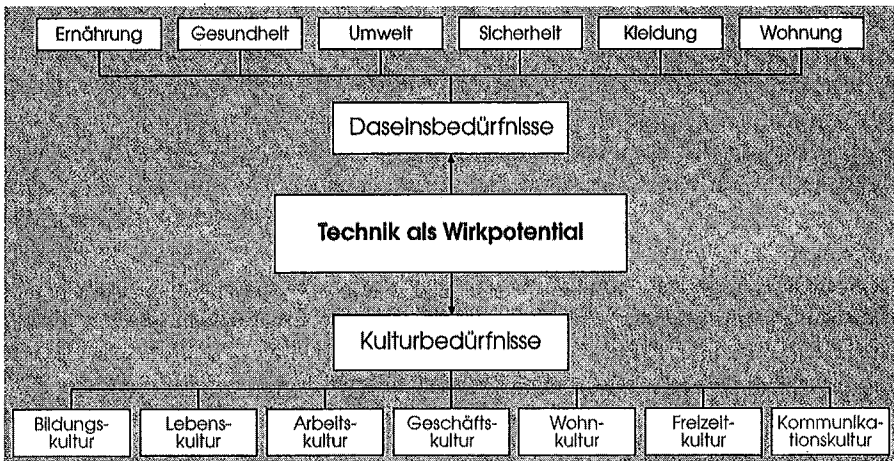


Abb. 1
Technik als kulturelles Wirkpotential

*Wandel des Arbeitssystems durch Technik
im ökosozialen Gleichgewicht*

Technik vermehrt und vermindert die Menge an Arbeit, sie verändert aber auch ihre Inhalte. Sie beeinflusst die Arbeitsorganisation nicht nur zeitlich und örtlich, sondern auch hinsichtlich der Arbeitsmittel und der Arbeitsmethoden. Die Technik der Zukunft fordert überwiegend ein wissensorientiertes Berufsbild, das nach Eigenschaften wie Zuverlässigkeit und Gründlichkeit ebenso fragt wie nach Kreativität und Führungsfähigkeit.

Die gegenwärtige Phase der Technikentwicklung zielt auf Dezentralisierung der Arbeit und führt in eine neindustrielle Arbeitskultur, die durch den Fortschritt immaterieller Produktionsprozesse im Bereich der Informationstechnik geprägt wird.

Von der Öffentlichkeit fast unbemerkt haben wir die Schwelle zur nächsten Generation von Produktionsunternehmen schon überschritten. Produktivität und Qualität, aber auch Flexibilität und Zuverlässigkeit haben weltweit ein Niveau erreicht, das auf der Grundlage konventioneller Arbeitskulturen nicht realisierbar gewesen wäre.

Die Konsequenz der rechnerunterstützten Produktionswirtschaft ist ihre kommunikative Vernetzung in global orientierten Märkten. Damit hat die Informationstechnik eine Schlüsselrolle bei der Erneuerung und Optimierung der Produktionswirtschaft erhalten, und zwar nicht nur örtlich, sondern in weltweiter Verknüpfung. Durch kontinuierliche Optimierung der Informationsinhalte in Verbindung mit einer direkten Regelung der Materialprozesse sowie einer dynamischen Disponierung der Produktionspotentiale erwächst gewissermaßen als konzertierte Aktion eine globale Produktionsstruktur.

Eine solche letztlich ökonomisch bestimmte Entwicklung der industriellen Wirtschaft erinnert an Habermas, der „davon ausgeht, daß Technik im industriellen Zeitalter mit Wissenschaft verschmolzen ist und daß beide wiederum mit der ökonomischen Verwertung eine Einheit eingehen“.

Ökonomische Zwänge sind es, die technologische Innovationen begünstigen oder überhaupt erst ermöglichen. Durch sie können aber die Quellen des Fortschritts in Wissenschaft und Technik auch beeinträchtigt werden. Dies gilt nicht nur für produkt-, prozeß- und systemorientierte technologische Entwicklungen der Wirtschaft im einzelnen, sondern auch für das globale weltwirtschaftliche Geschehen im ganzen. Koordinierung ist unverzichtbar. Eine durch Technologie geprägte freie Marktwirtschaft bedarf bestimmter Regulative. Damit ist das Feld der Technologiepolitik, aber auch die Problematik von Technik und Ethik angesprochen, die zur Frage nach einem Imperativ für technisches Handeln führt. Mit Sicherheit werden spezielle und begrenzte Entwicklungsprozesse angesteuert, sofern die

Nachteiligkeit und Gefährlichkeit dieser Artefakte erkennbar ist. Viel schwieriger ist die Bewertung von langfristig wirkenden Technologieprozessen, deren erreichbare Reife von Stabilität, Sicherheit und Ergiebigkeit in ihren Auswirkungen auf die Gesellschaft anfangs noch nicht vorausgesehen werden kann.

Technik stellt sich uns als neue Dimension von Verantwortung dar. Verantwortung fordert Kompetenz. Eine Kompetenz, die nicht nur von denjenigen zu entwickeln ist, die Technik erzeugen, sondern auch von allen, die ihren Nutzen in Anspruch nehmen. Viele technische Produkte können nur durch Lernen begriffen werden. Technische Bildung erzeugt Kompetenz und wird in unserer Lebensumgebung damit eine grundlegende Voraussetzung für den universell gebildeten Menschen. Technischer Fortschritt vollzieht sich trotz kontinuierlicher Entwicklung in dosierten Phasensprüngen. Diese benötigen vorbereitete gesellschaftliche Strukturen, die den zunehmenden technologischen Innovationsdruck verkraften und verarbeiten können. Damit Rationalisierung und Humanisierung konvergieren, muß Technik zugleich Maßnahmen der Humanisierung durch Technik auslösen. Die Sicherung unserer wirtschaftlichen und sozialen Existenz setzt die Verfügbarkeit über technologische Potentiale voraus. Eine Welt ohne Maschinen wird es nicht geben.

Technikwissenschaft als Innovationsbeschleuniger durch Forschungsdruck

Das Selbstverständnis der Technik drängt zu einer Reform der Wissenschaftsstruktur. Die derzeitige Wissenschaftslandschaft ist wegen ihrer Partikularisierung auf Integration nicht vorbereitet. Eine gegenseitige Durchdringung ingenieurwissenschaftlicher und gesellschaftswissenschaftlicher Denkweisen ist noch immer blockiert. Es ist dringend geboten, die gewachsenen Formen von Wissenschaftsabgrenzung zu überwinden. Dies gilt auch für die einzelnen Disziplinen innerhalb der Technikwissenschaft selbst. Wir benötigen zunehmend eine Querverriegelung der einzelnen Wissensbereiche.

Zu fordern ist eine innovationsorientierte Wissenschaftslehre der Technik. Vorher bedarf es einer klärenden Aufbereitung der einzelnen Disziplinen im Sinne eines zukunftsorientierten Selbstverständnisses. Darin ist sowohl eine Umstrukturierung nach innen als auch die interdisziplinäre Verknüpfung nach außen eingeschlossen. Die Technikwissenschaften bilden durch die Dynamik ihres fortschreitenden Wandlungsprozesses einen permanenten Innovationsgradienten, der nicht nur die Richtung der technologischen Entwicklung, sondern durch seine Steilheit auch die Geschwindigkeit des Wandels bestimmt. Damit erhält das jeweils verfügbare Wissenschaftspotential eine entscheidende Schlüsselfunktion für die wirtschaftli-

che Entwicklung. Wissen ist zu einem entscheidenden Rohstoff im globalen Wettbewerb geworden.

Eine solche Veränderung zentriert die Aufmerksamkeit der Gesellschaft zunehmend auf die Leistungsfähigkeit der Technikwissenschaften, wie sie sich vor allem durch das Erscheinungsbild der Technischen Universitäten in ihrer Doppelrolle von Lehre und Forschung ausdrückt. Als Grundlage für die Erneuerung des Selbstverständnisses der Technikwissenschaften benötigen wir auch eine Reform der Universitäten.

Ohne Zweifel richtet sich diese Aufforderung in erster Linie an die Ingenieure selbst, insbesondere an die Professoren der verschiedenen Technikwissenschaften. Wir brauchen den Dialog quer durch alle Disziplinen: zwischen den Fakultäten, zwischen den Universitäten, zwischen Theorie und Praxis, aber auch zwischen Politik, Wirtschaft und Wissenschaft. Auf der Ebene der politischen Entscheidungsgremien muß angesichts der globalen Wettbewerbssituation unserer Wirtschaft alles getan werden, um das Innovationspotential in Wissenschaft und Technik schneller zu entfalten. Technologietransferzentren reichen nicht aus, es muß der Innovationsdruck aus den Instituten verstärkt werden. Hierzu ist eine Verlagerung der Entscheidungskompetenz auf wettbewerbsfähige Forschungszentren ebenso wichtig wie die Flexibilisierung ihrer interdisziplinären Zusammenarbeit. Das wissenschaftliche Profil einer Universität wird durch die Arbeitskultur ihrer Institute geprägt und damit durch das Leistungspotential von Lehrenden und Lernenden.

Kennzeichen der Technikwissenschaft ist ihre Anwendungsorientierung. Der Erfolg ihrer Forschung hängt von institutionellen, materiellen und finanziellen Rahmenbedingungen ab, getrieben von der Kreativität und dem Engagement der beteiligten Forscher und Entwickler. Dabei kommt es auf Vorbilder an, die leistungsorientiert, fachlich herausragend geprägt, die Qualität des Kreativitätspotentials zur vollen Wirkung bringen. Dies gilt gleichermaßen für die Wissenschaft wie für die Praxis.

Optimierung technischer Systeme durch strategische Forschungsmethodik

Im Forschungsgegenstand der Technikwissenschaft kommt zugleich ihr Anwendungspotential zum Ausdruck, auf das schöpferisches Handeln fördernd zurückwirkt. Der technikwissenschaftlichen Problemstellung geht im allgemeinen ein Bedarf voraus.

Technikwissenschaft hat die Aufgabe, die mannigfaltigen Erscheinungsformen technischer Systeme zu erfassen und Modelle für ihre optimale Gestaltung zu entwickeln. Im einzelnen richtet sich technikwissenschaftliche Forschung auf die Bestimmung des Forschungsgegenstandes, seine systemwissenschaftliche Differen-

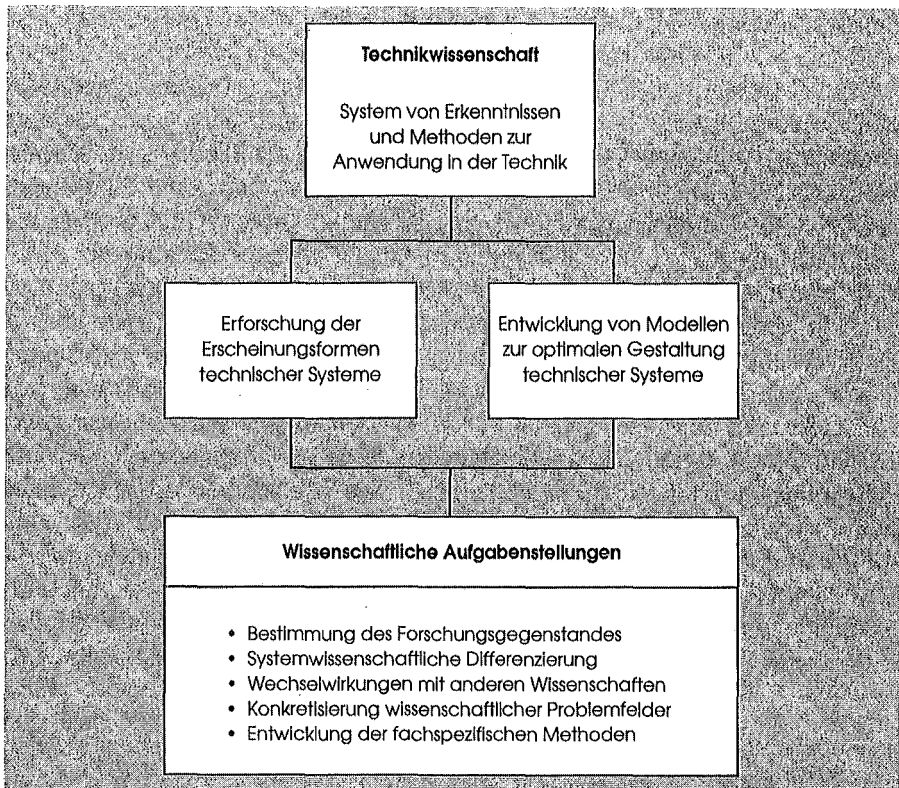


Abb. 2
Aufgaben der Technikwissenschaft

zierung, die Untersuchung der Wechselwirkungen mit anderen Wissenschaften sowie auf die Konkretisierung wissenschaftlicher Problemfelder. Außerdem muß die fachspezifische Methodik für die Technikwissenschaft weiterentwickelt werden (Abb. 2). Spezialisierung einerseits und Interdisziplinarität andererseits kennzeichnen ihre Arbeitsweise.

Die Anwendungsorientierung der Technikwissenschaft bildet ein in die Methodik übergreifendes Moment. Zielorientierte Problemlösungen erhalten ihren Sinn erst durch ihre Nützlichkeit aus technischer oder wirtschaftlicher Sicht.

Die Forschungsmethodik hat sich als eine Funktion konkreter Wechselwirkungen zwischen industrieller Praxis und erkenntnisleitender wissenschaftlicher Theorie

empirisch herausgebildet, wobei die Forderung nach innovativen Entwicklungen von Prozessen und Produkten ein zentrales Anliegen ist.

Erkenntnisdefizite in der Methodik technikwissenschaftlicher Forschung verweisen auf notwendige Analysen wissenschaftstheoretischer Art, auch im Sinne einer Neuordnung der Technikwissenschaft. Eine Vertiefung der Erkenntnisse über den Wissenschaftsbegriff in der Technik, über den Entwicklungsstand disziplinärer Integration und Differenzierung sowie über die Stellung von Technik und Wissenschaft innerhalb des Wissenschaftssystems ist von aktueller Bedeutung.

Mit wachsender Komplexität technikwissenschaftlicher Forschungsgegenstände sowohl in technologisch immanenter als auch in wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Hinsicht nimmt der Differenzierungsgrad der Technikwissenschaft ständig zu. Technikwissenschaftliche Forschung ist einerseits durch Spezialisierung, andererseits aber auch durch steigenden Bedarf an natur-, wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Integration sowie durch kooperative Organisationsformen gekennzeichnet. Sie ist ihrem Wesen nach interdisziplinäre Teamarbeit. Abb. 3 zeigt die Technikwissenschaft in ihrer differenzierten Verknüpfung.

Die Vermittlung und Aufbereitung des grundlagenorientierten Wissens bildet eine erste und unverzichtbare Aufgabe der Technikwissenschaft. Aufbau und Zustandsänderungen technischer Systeme bedürfen über eine qualitative Beschreibung hinaus der Darstellung durch quantitative Methoden. Dies bedeutet die Einbindung der

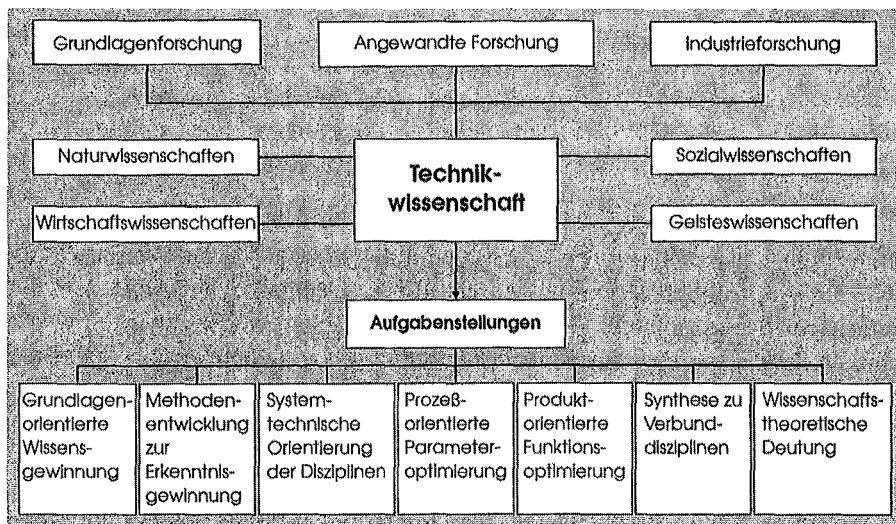


Abb. 3
Differenzierte Aufgabenstellung der Technikwissenschaft

Mathematik sowohl zur abstrakten Erklärung technischer Funktionsverknüpfungen als auch zur Theoriebildung für die Weiterentwicklung der Technik überhaupt. Die Mathematisierung der verschiedenen technischen Wissenschaftsdisziplinen ist unterschiedlich entwickelt. Zwar kann nicht immer der Grad ihrer mathematischen Durchdringung als Reife ihres wissenschaftlichen Fortschritts gewertet werden, aber dennoch läßt sich feststellen, daß eine Theoriebildung als wichtiges und anzustrebendes Instrumentarium der Erkenntnisgewinnung letztlich die Begründung wissenschaftlicher Disziplinen voraussetzt.

Unter der Berücksichtigung der Multidisziplinarität sind die wissenschaftstheoretischen Voraussetzungen sowohl für die analytisch-ursächliche als auch für die synthetisch-konstruktive Methodik der Technik zu überprüfen. Hierbei spielen die Wechselbeziehungen zwischen Theorie und Praxis eine vermittelnde und anregende Rolle. Die jeweilige Methodik technischer Forschung wird in ihrer disziplinen Spezifik vorbestimmt, und zwar durch ihr Anwendungsfeld in der Praxis und durch den realen Entwicklungsstand ihres Forschungsobjektes.

Aus der Marktdynamik der Technik leitet sich sehr oft ein Zeitzwang für technische Forschung ab. Sie lernt zwar aus der Vergangenheit, muß aber vorausdenken und helfen, die Zukunft zu gestalten. Aber wie weit reicht der Horizont ihrer Voraussicht? Wie steht es mit der Zuverlässigkeit etwaiger Prognosen? Was können wir wirklich über die Zukunft wissen?

Für Popper gehört die Wissenschaft zum Größten, was die Menschheit hervorgebracht hat, denn „ihre Methode ist die Fehlersuche.“ Diese Aussage ist modifiziert auf die Technik anwendbar. Alle technischen Produkte beinhalten ein Optimierungspotential. Es geht darum, Funktionen zu verbessern, Zuverlässigkeit zu steigern, Anstände zu überwinden, Erfahrungen zu sammeln, also Qualitätsstabilität zu erreichen. In diesem Sinne ist es Aufgabe der Technikwissenschaft, die Funktionssynthesen des Neuen zu betreiben und zugleich Fehleranalysen des Geschaffenen einzuleiten.

Die Erkenntnisprozesse der Technikwissenschaft verlaufen zwar rational, sind aber hinsichtlich ihrer Ergebnisse nicht vorhersehbar und auch nicht widerspruchsfrei. Sie sind damit auch nicht planbar. Wohl aber lassen sich Erkenntnisprozesse formieren und beschleunigen.

Banse setzt sich mit der Planbarkeit und Beherrschbarkeit gedanklicher Prozesse der technikwissenschaftlichen Forschung auseinander: „Der Technikwissenschaftler forscht, *wie* er vorgehen muß, um seinen Zweck zu erreichen.“ Und weiter heißt es: „Technische Lösungen zielen also stets auf das noch nicht Wirkliche, sie sind nicht „nur“ Entdeckungen, sondern Erfindungen und daher dem Ziel nach zweckgebunden. Gefragt ist letztlich nicht irgendein intelligentes Ereignis, sondern die in dem Produktionsprozeß umsetzbare, überführbare Leistung“.

In der Wissenschaftsarbeit ergibt sich aus dem Erfahrungsgewinn durch Erprobung sowie aus dem sachangemessenen Evaluationspotential der Industrie ein Primat der Empirie gegenüber der Theorie insofern, als technikbezogene Forschung in der Regel mit der empirischen Analyse bereits realisierter theoretischer Lösungen beginnt, neue Synthesen des dort erworbenen Erfahrungswissens erprobt, um dann zu neuen Prinziplösungen und deren Realisierung zu gelangen. Diese bilden schließlich die Grundlage neuer Theorien. Der methodische Weg führt also von einer letztlich praktischen Problemstellung über die Gewinnung empirischen Wissens durch Messung, Beobachtung, Experiment, Modellgenerierung und Simulation hin zur Aufstellung von Theorien und Paradigmen, die nicht nur erforschte Sachverhalte systematisch reflektieren, sondern auch auf die Praxis zurückweisende neue Forschungsperspektiven beinhalten.

Ebenso wie im Verhältnis von Empirie und Theorie wird das Primat der Praxis in den grundlegenden Methoden des Erfindens und Konstruierens deutlich. Beides zeichnet sich durch den Zusammenhang von Erfahrungswissen, analytisch-synthetischem Denken und funktionaler Kreativität aus. In der Technik resultieren Ideen und konstruktive Modelle meist aus gezieltem Suchen, experimentellem Vergleichen und anschließendem Auswählen optimaler Lösungsmöglichkeiten. Erfindungen entstehen auch durch vorgängige Theorien oder logische Deduktionen, aber noch mehr durch Erfahrung und Induktion.

Die Methodik technikwissenschaftlicher Forschung steht, wie ihr Gegenstand selbst, unter dem Aspekt von Wissenschaftlichkeit erst in den Anfängen einer möglichen und notwendigen Entwicklung zu disziplinärer Eigenständigkeit. Der hohe Integrationsgrad von industrieller Praxis und Forschung bedingt auch in methodischer Hinsicht eine starke Dominanz der konkreten Anwendungserfordernisse, denen die methodologische Reflexion und Verallgemeinerung der praktischen Erfahrungen untergeordnet bleibt.

Diese Situation manifestiert sich in einer Reihe von Forschungsdefiziten. So fehlen spezifische Untersuchungen der methodologisch relevanten Einflußfaktoren auf den Forschungsprozeß. Der konkrete Zusammenhang zwischen Forschungsbedarf, Problemstellung, Hypothesenbildung, Methodenorganisation, Theoriebildung und Evaluation bedarf der systematischen Analyse sowie der theoretischen Integration.

Technosophie als integrierende Metadisziplin der Technikwissenschaften

Angesichts der zunehmenden Komplexität und unaufhaltsamen Dynamik der Technik erwächst aus dem Bemühen um eine Erneuerung des Selbstverständnisses die Fragestellung nach der Begründung einer integrativ orientierten Leitdisziplin der

Technikwissenschaften. Diese müßte über den konventionellen Wirkungsbereich der Technik hinausreichen, Geistes- und Sozialwissenschaften nicht nur einbinden, sondern auch zum Dialog herausfordern.

Hieraus ergibt sich allerdings die Frage, ob die Technikwissenschaften auf einen „Dialog der Kulturen“ vorbereitet sind. Zwar ist der Reifungsprozeß der noch jungen Technikwissenschaften fachspezifisch teilweise weit fortgeschritten, aber dennoch bleibt ein Unbehagen bei der Frage, ob das Selbstverständnis der Ingenieure zu ihrer Wissenschaft bisher genügend entwickelt werden konnte. Beim Verlassen der Hülle ihrer sachorientierten Funktionswelt wird spürbar, daß die gewohnten Werkzeuge nicht mehr wirken. Sie müssen für den Dialog mit anderen Wissenschaftskulturen aufbereitet werden. Ingenieure müssen lernen, in einem erweiterten Spannungsfeld zu agieren, das ihnen nach Ausbildungs- und Berufsethos fremd ist. Es geht letztlich auch um die Bereitschaft zum politischen Handeln und damit um die Bereitschaft zur politischen Verantwortung.

Diese Herausforderung führt zur Begründung einer metatechnischen Wissenschaftslehre, die uns das geistige Rüstzeug für den interdisziplinären Dialog der Wissenschaften mit Wirtschaft und Politik liefert.

Ein erstes und wichtiges Merkmal dieser integrierenden Metadisziplin der Technikwissenschaft, die wir Technosophie nennen könnten, sollte darin bestehen, daß sie von Ingenieuren begründet und entwickelt wird, um deren Selbstverständnis dann als Beitrag zur Anreicherung des allgemeinen kulturwissenschaftlichen Dialogs einzubringen.

Das Objekt technosophischer Forschung ist die Technik. Neben einer allgemeinen Technosophie sind spezielle Bereiche denkbar, die systemtechnisch, methodisch oder historisch geprägt sein könnten. Die vornehmliche Aufgabe einer Technosophie läge jedoch in der Begründung einer Lehre über die wirksamen Hintergründe und Zusammenhänge sich schöpferisch entwickelnder Technik.

Technosophie hat als Lehre vom Wissen über den Kulturwandel durch Technik immer etwas mit Veränderung unseres Seins zu tun. Sie sucht Wege zur Reform unserer Industriegesellschaft und muß deshalb die Handlungspotentiale in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik integrieren. Es wird immer deutlicher, daß wir die globalen Probleme unserer Zeit nicht mehr mit den traditionellen Methoden und Handlungssystemen lösen können. Das gilt insbesondere für ein sozial orientiertes Produktionssystem mit einem Wirtschaftswachstum, das fast ausschließlich auf Produktivitätssteigerung durch Rationalisierung beruht, ohne das gesellschaftliche Problem der steigenden Arbeitslosigkeit lösen zu können.

Durch eine zunehmende Verlagerung des Schwerpunktes der industriellen Produktion zu immateriellen Gütern ändern sich auch die Paradigmen der technikwissenschaftlichen Forschung. Die informationstechnisch erschlossene Kommunikation von global vernetztem Wissen wird Entfaltungsmöglichkeiten erreichen, die alle

bisherigen Erwartungen übertreffen. Objektivierungen dieser technologisch getriebenen Kreativität sind Maschinenprogramme und Systeme einer digitalisierten Welt der Technik, die nicht nur neue Gütermärkte bilden, sondern auch zu einer Neuorientierung der Wissenswelt führen. Vom Menschen konstruiert, entsteht aus einer umfassenden Akkumulation von theoretischem Wissen, praxisgeführten Erfahrungsprozessen, menschlichem Handlungsvermögen sowie einer empfindsamen Einfühlung in den inneren Zusammenhang der Natur eine Bewußtwerdung in unserem Denken, die in ein Metasystem zukünftiger Technologien einmündet. Die für eine solche Reformierung unserer Industriegesellschaft zu entwickelnde Kreativität wird aber zugleich der Engpaß für den Fortschritt sein. Im Wettbewerb der Technologien werden diejenigen Volkswirtschaften und Unternehmen auf Dauer vorn liegen, die aus innerer Kraft einen wissensgetriebenen Innovationsdruck erzeugen, der das Tempo des Fortschritts bestimmt. Genauso wichtig wird es aber sein, in allen Ebenen des Managements einen wissensgetriebenen Entscheidungsdruck zu erzeugen, der das Tempo der Geschäftsprozesse beschleunigt.

Systemorientierte Reformstruktur der Technikwissenschaften

Die Grundfunktion technischer Systeme besteht darin, Ressourcen der Naturwelt in ein Nutzungspotential als Hilfwelt der Gesellschaft zu transformieren. Damit ist die gesamte Komplexität der politischen, wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Entwicklung eingeschlossen. Die Bereiche der Technik müssen ganzheitlich gesehen und nach ihrer gesellschaftlichen Wirksamkeit strukturiert werden.

Neben der ideellen Zielsetzung der Entwicklungsforschung für die Technikwissenschaft steht die nüchterne und praktische Fragestellung nach den Grundlagen, den Ergänzungen und den Verfeinerungen ihres strukturellen Aufbaus. Es gilt, das Gemeinsame und auch das Trennende der verschiedenen Disziplinen zu erkennen.

Die systemtheoretische Analyse sieht Technik als integriertes Ganzes, aber auch gleichzeitig in ihren Strukturen und Funktionen. Eine Untergliederung ergäbe folgende Systemgruppen (Abb. 4):

- urtechnische Systeme
- bautechnische Systeme
- produkttechnische Systeme
- netztechnische Systeme und
- sozialtechnische Systeme.

Ropohl zielt in seiner Systemtheorie der Technik „auf eine umfassende Systematik aller denkbaren technischen Systeme, die es gestattet, die Totalität aller möglichen technischen Artefakte in genereller Form zu beschreiben und zu klassifizieren“.

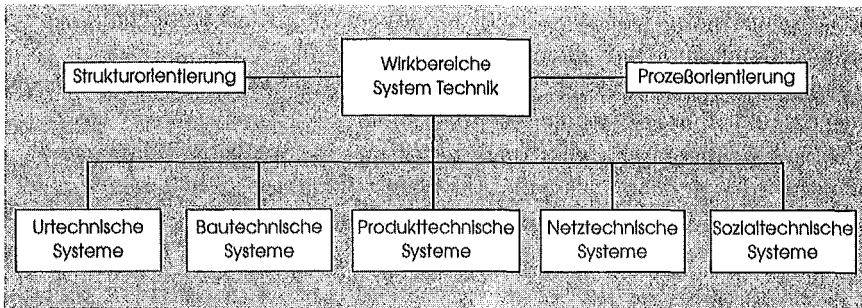


Abb. 4
Wirkbereiche technischer Systeme

Er versteht die technische Entwicklung als Strukturveränderung soziotechnischer Systeme, die auch deren funktionales Verhalten beeinflusst. Dabei ist sowohl eine starke quantitative Vermehrung der Sachsysteme als auch eine erhebliche qualitative Verbesserung der Funktionserfüllung mit dem Fortschritt der Technik zu erkennen.

Im Kern des soziotechnischen Systems wirkt das Dreieck Wissenschaft, Technik und Wirtschaft als Pulsator des Fortschritts. Die Triebkräfte sind die Kreativitätspotentiale zum Aufbau eines wissenschaftlich und wirtschaftlich rationalisierten Systems, das vom Menschen betrieben wird.

Um Technik als System darzustellen, bedarf es der Entwicklung geeigneter Modelle. Diese müssen sowohl die hohe strukturelle Komplexität dessen, was wir Technik nennen, als auch die dynamischen Prozesse der Transformationsfunktionen abbilden.

Technische Systeme erfordern Veränderung, Fortschritt und Optimierung. Ihre Wirkung ist das Ergebnis vieler kleiner Schritte, die strukturorientiert verlaufen. Es ist ein Wachstumsprozeß des Wissens, der einem Maximum entgegenstrebt, ohne es je zu erreichen. Andererseits besteht der Fortschritt der Technik auch in einer Verfeinerung der Elemente, die einem Minimum entgegenstrebt, ohne es je zu erreichen. Schließlich besteht der Fortschrittsprozeß der Technik auch in einer Vermehrung der Qualität, die einem Optimum entgegenstrebt, ohne es je zu erreichen.

Ziel einer Theorie technischer Systeme ist eine allgemeine Interpretation und Deutung technischer Funktionsgebilde im Sinne einer systemtechnischen Orientierung ihrer Disziplinen.

Technische Systeme mit innerer Verknüpfung ihrer Elementarfunktionen können Zellensysteme, solche mit äußerer Verknüpfung Netzsysteme genannt werden. Netz-

technisch orientierte Systeme bilden die Energietechnik, Verkehrstechnik, Kommunikationstechnik und Umwelttechnik.

Die Transformationsfunktion der Technik ist als Wandel der Naturwelt in das Nutzungspotential einer Hilfswelt zu deuten.

Ist die Zielorientierung technischer Prozesse auf eine qualitative Maximierung der Produktfunktion gerichtet, wäre die Aufgabenstellung der Technikwissenschaft auf eine funktionsorientierte Optimierung zu steuern. Für diesen Bereich wären Produkte der Maschinenteknik, Elektrotechnik, Mikrotechnik und Informationstechnik beispielhaft zu nennen.

Bilden sich zwischen Wissenschaftsbereichen mehrerer Disziplinen Durchdringungen von unterschiedlichen Elementarfunktionen zu neuen Gesamtfunktionen, entstehen synthesegeprägte Verbunddisziplinen. Hierzu gehören die Medizintechnik, Biotechnik und die Sozialtechnik.

Die Aufgabenstellungen der Technikwissenschaft wären nicht vollständig, würde man die Erkenntnisdefizite in der fehlenden Analyse über den wissenschaftstheoretischen Status übersehen.

Die Methodik der Technikwissenschaft ist dadurch gekennzeichnet, daß sie sich als eine Funktion konkreter Wechselwirkungen zwischen industrieller Praxis und erkenntnisleitender wissenschaftlicher Theorie im Forschungsprozeß empirisch herausbildet. Sie existiert bisher überwiegend und primär als implizierter Bestandteil der Forschungspraxis. Eine der grundlegenden Aufgaben ist es, Struktur und Wirkungsweise aller theoretischen und praktischen Bestimmungsgrößen zum Aufbau einer Forschungsmethodik zu analysieren. Ziel einer solchen Systematik ist letztlich die Definition eines eigenständigen Beitrages zur Theorie technischer Systeme aus ganzheitlicher Sicht.

Permanenter Qualitätszuwachs technischer Systeme durch Innovation

Technik befindet sich in einer permanenten Zustandsänderung. Jede Beschreibung des Entwicklungszustandes technischer Systeme ist immer nur die Beschreibung eines Momentanzustandes. Der Änderungsgradient technischer Systeme kann untereinander sehr verschieden sein.

Zustandsänderungen technischer Systeme sind einerseits bestimmte, also gezielt geplante Funktionen, andererseits auch unbestimmte und zufällige, meist unerwünschte Störungen der Funktionen.

Es kann auch von der Systemfähigkeit gesprochen werden, die sich aus strukturbedingten Fehlergrößen ergibt und die Prozeßfähigkeit beeinträchtigt. Der Funktionszustand eines technischen Systems ist ordnungsgemäß, wenn das Funktions-

ergebnis die vorgegebenen Toleranzen einhält. Technische Systeme verhalten sich in diesem Sinne nicht deterministisch, sondern stochastisch.

Aufgrund der hohen Komplexität und meist vorhandenen Wechselwirksamkeit der einzelnen Störparameter ist eine theoretisch abgeleitete Vorhersage des Qualitätsverhaltens technischer Systeme sehr erschwert. Deshalb sind experimentelle und empirische Untersuchungen meist unverzichtbar.

Aus dem Modell abstraktiver Systemeigenschaften werden materiell darstellbare Wirkfunktionen abgeleitet, so daß eine physische Entstehung des geplanten Systems möglich wird. Aus den Systemparametern werden schließlich Konstruktionsparameter, die die angestrebte Funktionsqualität sichern müssen.

Für die Optimierung der Systemauslegung ist der Wahrheitswert aller Entscheidungen von hoher Bedeutung. Insbesondere ist bei schwierigen Verknüpfungen der Findungsprozeß zu einer optimalen Lösung aufwendig, so daß der erreichbare Wahrheitswert eingeschränkt ist. Oft sind die Entwicklungsprozesse von technischen Systemen mehrläufig, führen also nicht zu einer einzigen Lösung, sondern zu einer mehrfachen Wahrheit.

Hierin liegt ein Dilemma der Entwicklung technischer Systeme: Das Lösungsmodell der Aufgabenstellung läßt sich meist nicht mit Hilfe einer formulierbaren Handlungsvorschrift direkt aus dem Anforderungsmodell ableiten. Sowohl die Eigenschaftsparameter als auch die Lösungsparameter bilden einen mehrdimensionalen Funktionsraum, der nicht frei von Widersprüchen und Zwängen ist. Hinzu kommt erschwerend, daß nicht alle Systeme Neuentwicklungen sind. Durch Vorgabe des Vorhandenen können die gestalterischen Freiheitsgrade bereits eingeschränkt sein. Gleiches gilt auch für die fortgeschrittenen Phasen des Entwicklungsprozesses. Hieraus wird deutlich, daß technische Systeme nicht immer die einzige optimale Lösung darstellen. So ist es erklärbar, daß bei gleicher Aufgabenstellung unterschiedliche Lösungen vorliegen können, die aber doch nahezu gleiche Funktionsqualitäten aufweisen. Es wird dann vom Nutzer diejenige Lösung ausgewählt, die unter den gegebenen Bedingungen als besonders günstig gelten kann.

Die Modellierung der ganzheitlichen Wirksamkeit technischer Systeme wird mit zunehmender Komplexität schwieriger. Umgekehrt läßt sich ein technisches System um so exakter und deterministischer in seiner Transformationsfunktion darstellen, desto einfacher es hinsichtlich seiner Elementarstruktur und seines Verknüpfungsgrades ist. Dies bedeutet methodisch, daß für die Modellierung technischer Systeme die ganzheitliche Funktion auf die Wirksamkeit von Teilfunktionen zurückgeführt werden muß.

Techniksysteme geben nur einen Sinn, wenn sie funktionieren. Dies setzt voraus, daß sie gebaut und praktisch wirksam sind. Mit Hans Rumpf ausgedrückt, „wohnt dem technischen Handeln eine pragmatische ‘Moral’ inne: die Verwirklichung entscheidet über den Wert“. Und weiter heißt es bei Rumpf: „Ausschuß bleibt Aus-

schuß, auch wenn die Theorie ausgezeichnet und die Absicht die beste war. Andererseits ist jedoch das Mißlingen der große Lehrmeister“. Somit muß das erste Leitaxiom technischen Handelns auf *Funktionalität* gerichtet sein.

Technik ist das Ergebnis eines Aufwandes, um Anforderungen zu erfüllen, dies allerdings mit einem Minimum an Anstrengung. Das ökonomische Prinzip des kleinsten Aufwandes, von Leibniz als metaphysisches Prinzip eingeführt, ließe sich als Maxime auf die Entwicklung technischer Systeme anwenden. Damit dürfte das zweite Leitaxiom technischen Handelns auf *Rationalität* gerichtet sein.

Technische Systeme unterliegen einer permanenten Veränderung. Die Dynamik des Fortschritts entsteht aus der Kreativität des Menschen. Sie ist in die Zukunft gerichtet und damit unbegrenzt. Der Erwerb von Wissen ist offen, somit auch seine Anwendung in technischen Systemen. Das dritte Leitaxiom technischen Handelns ist deshalb auf *Optimalität* gerichtet.

Technologietransfer als multidisziplinärer Wissenschaftsprozess

Die soziotechnische Komplexität des Gegenstandes technikwissenschaftlicher Forschung erfordert Strategien einer auch methodisch angepaßten Erweiterung. Abb. 5 verdeutlicht die multidisziplinäre Verknüpfung der Technikwissenschaft mit anderen Wissenschaftsbereichen. Die technikwissenschaftliche Methodik muß umfangreichen und komplizierten Problemstellungen sowohl theoretisch als auch praktisch

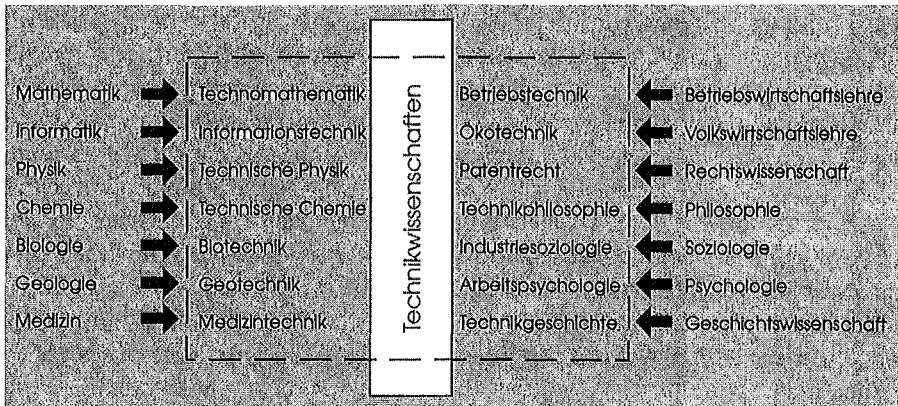


Abb. 5

Innovationsorientierte, multidisziplinäre Verknüpfung der Technikwissenschaften mit anderen Wissenschaftsbereichen

gewachsen sein. So wenig wie Technik nur durch ihre Funktionalität zum Ausdruck kommt, muß auch die Methodik ihrer Entwicklung die natürlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen einbeziehen. Es geht in letzter Konsequenz um die Optimierung gesellschaftlicher Wandlungsprozesse. Es ist leicht einzusehen, daß mit zunehmender Komplexität technischer Systeme die Verknüpfungsbreite zu anderen Wissenschaftsdiziplinen zunimmt.

Die industrielle Entwicklung der Zukunft wird ohne Integration von neuem Wissen weder in der Erfüllung von Qualitätsanforderungen an die Produkte noch in der Beherrschung der Produktivitätsfaktoren bestehen können. Das heißt aber auch, daß sich Wissenschaft und Forschung diesen Anforderungen anpassen und enge Wechselbeziehungen zur industriellen Praxis entwickeln müssen.

Technische Forschung zielt sowohl auf neue Erkenntnisse über strukturelle und funktionale Beziehungen beziehungsweise Gesetzmäßigkeiten ihres Gegenstandes als auch auf die technologische und wirtschaftliche Umsetzung dieser Erkenntnisse in Produkt- und Prozeßinnovationen industrieller Produktion. Letztere stellen die den Forschungsprozeß ganzheitlich bestimmende Zielsetzung dar. Das heißt, technische Forschung ist in ihrem Kern Technologietransfer (Abb. 6).

Die Triebkräfte dieser Forschung resultieren aus dem technologisch-wirtschaftlichen Bedarf der Praxis. Diese stellt zugleich die entscheidenden Maßstäbe und Instrumente zur Überprüfung und Bewertung der Problemlösungen bereit. Denn erst in der Praxis werden die Forschungsergebnisse in die Wechselwirkungen zwischen Mensch, Technik, Ökonomie und Ökologie gestellt.

Forschungsbedarf besteht auch hinsichtlich der Bestimmung des Wirkungsgrades der verschiedenen institutionellen Formen, in denen technikwissenschaftliche Forschung gegenwärtig stattfindet und die ihrerseits die Methodik des Forschungs-

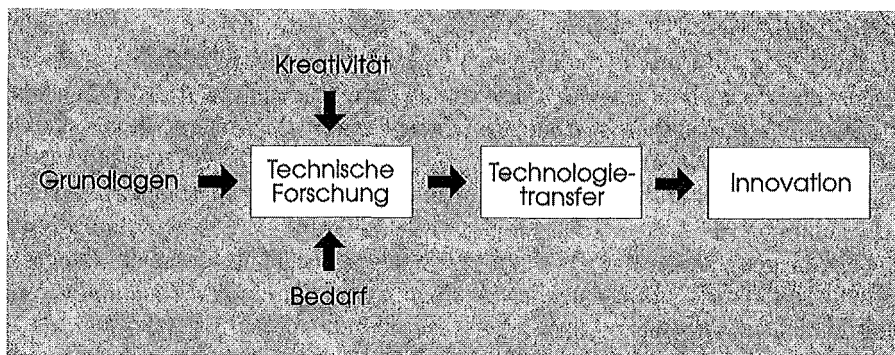


Abb. 6
Technische Forschung als Technologietransfer

prozesses beeinflussen. Hier wird die wissenschaftspolitische Relevanz der zu behandelnden Thematik besonders deutlich, wenn wir Antworten auf die aktuellen und kontrovers diskutierten institutionellen Vermittlungsprobleme im Verhältnis von Grundlagenforschung und angewandter Forschung speziell für den industriellen Sektor suchen.

*Technologiemanagement ist als
wissenschaftliche Aufgabe unverzichtbar*

In der öffentlichen Diskussion besteht Übereinstimmung hinsichtlich der Notwendigkeit, die Umsetzung von neuen Erkenntnissen der Forschung in industriell nutzbare Produkte zu beschleunigen. Eines der wesentlichen Hemmnisse bei der Beschleunigung dieser Vorgänge ist durch die Vorbedingungen der Ideenproduktion gegeben. Die Entwicklung neuer Produkte, die Entdeckung neuer Methoden, Prinzipien und Vorgehensweisen erfordern neben Kreativität auch marktbezogene Sachkenntnis und spezifische Erfahrung. Die Ideenfindung ist überwiegend mit dem Eindringen in neue Gebiete verbunden. Dies bedeutet auch eine stärkere Verknüpfung bisher nicht im Zusammenhang bearbeiteter Gebiete. Technologietransfer umfaßt nicht nur mehrere Disziplinen übergreifende fachwissenschaftliche Kenntnisse, er beinhaltet auch prototypische Realisierungen, Managementwissen und den Aufbau angepaßter Berufsqualifikationen.

Wettbewerbsfähigkeit allein wird für kommende wirtschaftliche Herausforderungen nicht mehr ausreichend sein. Es geht vielmehr um wirtschaftliche und technologische Führungspositionen im weltweiten Maßstab. In den Unternehmen der Hochtechnologie haben Investitionen ein solches Ausmaß angenommen, daß nur den zeitlich und qualitativ ersten Anbietern eine wirkliche Führungsposition ermöglicht wird.

Die Forschung wird im internationalen Vergleich nicht nur an erarbeiteten Ergebnissen, sondern auch an der Qualifikation und dem Engagement der Wissenschaftler gemessen. Eine kognitiv-technische Überlegenheit allein reicht allerdings nicht aus, es kommt auf die effektive Nutzung des Wissens an.

Zur Initiierung und Durchsetzung marktentscheidender Erneuerungsprozesse bedarf es eines ganzheitlichen Technologiemanagements, das von den Technikwissenschaften ausgeht. Daher muß Technologiemanagement nicht nur als ein integraler Bestandteil der Ausbildung unserer Ingenieure, sondern auch als technikwissenschaftliche Disziplin entwickelt werden.

Technologiemanagement ist auf die Anwendung technologischen Wissens ausgerichtet, es will Erfolgspotentiale eines Unternehmens entwickeln und nutzen und

hat damit eine Umsetzungsfunktion bei der technologischen Erneuerung des Ganzen wie auch seiner Teilbereiche.

Technologiemanagement ist als Anleitung zum Gebrauch fortschrittlicher Technik eine Führungslehre, die unternehmerisch gesehen immer unter dem Imperativ des wirtschaftlichen Erfolges stehen muß.

Technologische Führungsfunktionen zielen auf Realisierung. Der Zielerreichung sind die Zielsetzung und die Leistungsdurchsetzung vorgeschaltet. Angesichts der weitreichenden Bedeutung der Technik für die Entwicklung der Gesellschaft ist Technologiemanagement auch mit einem hohen ethischen Anspruch verbunden. Die Nutzbarmachung technischer Erkenntnisse muß deshalb über den Imperativ des wirtschaftlichen Erfolgswanges hinaus auch den ethisch-sozialen Ansprüchen gerecht werden.

Die Rolle des Technologiemanagers ist nicht die eines Kontrolleurs und besserwissenden Lehrers, sondern die eines Ideengebers und Organisators, der die ihm anvertrauten Mitarbeiter zum erfolgreichen Wirken befähigt. Der Technologiemanager muß motivieren können und kreative Denkfüräume schaffen, ohne die innovative Prozesse nicht ablaufen können.

Eine entscheidende Aufgabe des Technologiemanagements ist die Beschleunigung des Technologietransfers. Es gilt, weltweit Innovationspotentiale durch kooperatives und simultanes Forschen, Entwickeln, Produzieren und Vermarkten zu erschließen, mit dem Ziel, die Umsetzungszeit für neue Produkte oder Prozesse weiter zu verkürzen. Um qualitativ hochwertige Leistungen kurzfristig zu konkurrenzfähigen Preisen erbringen zu können, bedarf es auch einer verstärkten Kooperation zwischen Forschung und Praxis. Dabei ist der Wissenstransfer sowohl Bringschuld der Wissenschaft als auch Holschuld der Wirtschaft.

Von zentraler Bedeutung ist schließlich die Schaffung einer technologieorientierten Unternehmenskultur, einer Kultur, die Kreativität und Innovation, ja Technikbegeisterung nicht nur belohnt, sondern als selbstverständliche Elemente des Unternehmensalltags hervorhebt.

Der Aufschwung im 21. Jahrhundert wird von der Innovationskraft unserer technologischen Ressourcen aller betroffenen Industriebereiche entscheidend abhängen. Dabei stellt sich die Frage, ob wir uns rechtzeitig auf diesen großen Phasensprung vorbereiten, und in welcher Weise dabei strategische Ziele auch kurzfristig zur notwendigen Unternehmenssicherung beitragen können.

Hierzu wäre allerdings nicht nur eine effiziente und unbürokratische Projektförderung, sondern auch die Stimulierung einer „Forschungswirtschaft“ erforderlich, die als ein zentraler Wirtschaftsbereich für die Sicherung des erreichten volkswirtschaftlichen Wohlstands eine unentbehrliche Schlüsselrolle erhält. Die Förderung von Forschung und technischer Entwicklung braucht Kontinuität, braucht aber auch Beschleunigung und Kanalisierung.

Vor diesem Hintergrund kann die Notwendigkeit zur Erneuerung eines ganzheitlichen, marktorientierten Technologiemanagements nicht stark genug betont werden. Es gilt, durch eine breite Offensive in Forschung, Lehre und industrieller Praxis die Voraussetzungen für die Umsetzung innovativer Ideen in erfolgreiche Produkte durch fähige Technologiemanager zu schaffen. Es kommt nicht nur auf Virtuosität des Orchesters an, sondern auch auf die Kreativität des Dirigenten.

Literatur

- Banse, G.: Erkenntnismethode in den Technikwissenschaften, Berlin: Akademie Verlag, 1986.
- Gehlen, A.: Die Seele im technischen Zeitalter, Hamburg: Rowohlt, 1957.
- Heidegger, M.: Nur ein Gott kann uns retten. In: Der Spiegel 30 (1976), Nr. 23, S. 193.
- Lompe, K. (Hrsg.): Techniktheorie, Technikforschung, Technikgestaltung. In: Beiträge zur sozialwissenschaftlichen Forschung, Band 105, Opladen: Westdeutscher Verlag, 1987.
- Parthey, H. (Hrsg.): Problem und Methode in der Forschung, Berlin: Akademie Verlag, 1978.
- Parthey, H.; Schreiber, K.: Interdisziplinarität in der Forschung, Berlin: Akademie Verlag, 1983.
- Ropohl, G.: Eine Systemtheorie der Technik, München: Hanser, 1979.
- Rumpf, H.: Über den Sinn technischen Handelns, IBM Deutschland, Stuttgart, 1978.
- Spur, G.: Industrielle Praxis und wissenschaftliche Theorie in der Methodik produktions-technischer Forschung. APK 3/1990, Akademie der Wissenschaften, Berlin, 1990.
- Spur, G.: Technische Bildung heute und morgen. In: Wilhelm von Humboldt, Vortragszyklus zum 150. Todestag, Berlin: de Gruyter, 1986.
- Spur, G.: Vom Wandel der industriellen Welt durch Werkzeugmaschinen, München: Hanser, 1991.
- Zimmerli, W. Ch.: Technik und Wissenschaft als Kultur. Kongreßbeiträge Technische Universität Braunschweig 1996.

Festschrift
zum
100. Geburtstages von Hans Faltin
(26. September 1896 – 28. Juni 1961)
und zum
25. Todestages von Walther Pauer
(1. April 1887 – 20. November 1971)

Einführung

Am 8. November 1996 fand aus Anlaß des 100. Geburtstages von Hans Faltin (26. September 1896 – 28. Juni 1961) und des 25. Todestages von Walther Pauer (1. April 1887 – 20. November 1971) an der Technischen Universität Dresden ein Ehrenkolloquium statt. Veranstalter waren die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften und die Technische Universität Dresden und dies aus gutem Grund: Hans Faltin und Walther Pauer waren Hochschullehrer an der Dresdner Universität und Mitglied in der Berliner Akademie.

Die auf dem Ehrenkolloquium gehaltenen Vorträge sind in der vorliegenden Festschrift zusammengefaßt.

Achim Dittmann

Laudatio

Das wissenschaftliche Erbe von Hans Faltin und Walther Pauer
aus der Sicht heutiger energietechnischer Lehre und Forschung

Meine sehr verehrten Damen und Herren,

gestatten Sie mir zunächst einige persönliche Vorbemerkungen.

Ich habe weder Hans Faltin noch Walther Pauer persönlich kennengelernt und dennoch haben mich beide über längere Lebensabschnitte begleitet. So stellte der „Faltin“, wie sein Lehrbuch *Technische Wärmelehre* in Studentenkreisen kurz genannt wurde, insbesondere durch die sehr umfangreiche Aufgabensammlung eine wertvolle Hilfe dar, einen der „Scharfrichter“ des Maschinenbaustudiums unbeschadet zu überstehen. Des weiteren war es mir als junger Assistent in den Jahren 1968/69 vergönnt, an der Überarbeitung des Pauerschen Lehrbuches *Einführung in die Kraft- und Wärmewirtschaft* mitzuarbeiten, ein Werk, das nach meiner Auffassung bis heute nicht an Aktualität und Aussagekraft verloren hat und zu *den* Standardwerken der Energiewirtschaft zählt.

Sehr geehrte Angehörige der Familien Faltin und Pauer,
verehrte Gäste und Mitarbeiter unserer alma mater!

Es gab mehrere gute Gründe, ein gemeinsames Ehrenkolloquium der Technischen Universität Dresden und der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften für Hans Faltin und Walther Pauer durchzuführen. Zum einen sind der 100. Geburtstag von Hans Faltin und der 25. Todestag von Walther Pauer Anlaß und Verpflichtung für uns, ihre Leistungen für unsere alma mater zu würdigen. Zum zweiten waren beide ordentliche Mitglieder der Deutschen Akademie der Wissenschaften, und es war Anliegen ihrer Nachfolgeeinrichtung, der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, zum Gelingen einer derartigen Veranstaltung beizutragen. Zum dritten haben Faltin und Pauer nach dem Kriege zur etwa gleichen Zeit an der damaligen Technischen Hochschule Dresden in der gleichen Fakultät gearbeitet, und viertens, und hier spreche ich in eigener Sache, haben sie bei gleicher „Ziehmutter“, nämlich der „Technischen Thermodynamik“,

durch eine ausgeprägte interdisziplinäre und integrative wissenschaftliche Arbeit beachtenswerte Beiträge zur Entwicklung unterschiedlicher benachbarter Fachdisziplinen geleistet.

In der Annahme und Hoffnung, daß ich den Festrednern des heutigen Kolloquiums, Herrn Professor Fratzscher und Herrn Professor Albring, nur unwesentlich vorgegreife, gestatten Sie mir dies mit einigen Ausführungen zum Lebensweg und zum Wirken von Hans Faltin und Walther Pauer in Dresden zu verdeutlichen.

Hans Faltin wurde am 26. September 1896 in Halle geboren. Nach dem Besuch des humanistischen Gymnasiums in Sangerhausen entschloß er sich – wohl inspiriert durch seinen Vater, der als Oberingenieur an der Maschinenfabrik in Sangerhausen tätig war – für ein technisches Studium in Hannover und Breslau. Nach Beendigung des Studiums war er von 1921–1925 Assistent am Maschinenlabor der Technischen Hochschule Breslau, promovierte zum Thema *Erforschung der Verluste bei der Umsetzung in Dampfturbinenbeschaufelungen, Versuche mit umlaufenden Schaufeln* und war nach der Habilitation Privatdozent für die Lehrgebiete *Meßgeräte der Kraft- und Energiewirtschaft* und *Heizung, Lüftung, Klimatisierung*. 1939 erfolgte seine Ernennung zum außerplanmäßigen Professor. Neben Breslau waren Brunn und Halle weitere Stationen seiner Hochschullehrerlaufbahn. Obwohl deren Unterbrechung und der Beginn einer Tätigkeit in den Leunawerken am 10. Januar 1946 ihn persönlich sehr berührt und geschmerzt haben werden, war die Arbeit, zunächst als Abteilungsleiter des Konstruktions- und Ingenieurbüros Leuna und später des wärmetechnischen Versuchslaboratoriums der Chemiewerke Leuna, prägend für sein späteres Wirken an der Technischen Hochschule Dresden. Die intensive Beschäftigung mit Problemen der technischen Chemie bzw. der Verfahrenstechnik hat ihm den Blick für die Notwendigkeit fächerübergreifender interdisziplinärer Forschungsarbeit wenn nicht geöffnet, dann erweitert und sein Wirken an der Technischen Hochschule Dresden weitestgehend bestimmt.

Dies belegen schon der Titel seiner nach der Berufung zum ordentlichen Professor für Thermodynamik und thermische Strömungsmaschinen der Technischen Hochschule Dresden am 1. Oktober 1949 gehaltenen Antrittsrede *Thermodynamische und strömungstechnische Probleme bei der technischen Durchführung von Kontaktreaktionen* und die Vielzahl der von ihm persönlich gehaltenen Vorlesungen über *Technische Wärmelehre, Wärmeübertragung, Ausgewählte Kapitel der allgemeinen und chemischen Thermodynamik, Dampf- und Gasturbinen, Kreisverdichter, Wärmetechnische Meßverfahren* und *Heizung, Lüftung, Klimatisierung*. Besonders ist in diesem Zusammenhang hervorzuheben, daß sich Hans Faltin, persönlich für die Einrichtung eines Lehrstuhls für Verfahrenstechnik eingesetzt und dies bis zur Berufung von Professor Boesler mit Nachdruck betrieben hat.

Von Beginn seiner Tätigkeit an war es sein erklärtes Ziel, an der zu großen Teilen

zerstörten Hochschule in Dresden materielle Voraussetzungen für die Grundlagen- und vor allem die industriennahe Forschung zu schaffen. Dies tat er mit Einsatz seiner ganzen Persönlichkeit. Ich zitiere aus einem Brief an den Dekan der Fakultät Maschinenwesen: „Ich spreche die Bitte aus, im Senat sich für die Aufnahme des Bauvorhabens (Merkel-Bau) in den Plan des Jahres 1952 mit allen Mitteln einzusetzen ... Ich bitte, auch den Senat darüber nicht in Zweifel zu lassen, daß ich den bei jedem Besuch in Leuna wiederholten lockenden Angeboten auf Rückkehr in das Chemiewerk nachgeben werde, wenn es zu einer Ablehnung kommen sollte.“ So haben wir es dem steten Drängen von Hans Faltin zu verdanken, daß am 17. Oktober 1957, dem 50. Todestag von Gustav Zeuner, der Merkel-Bau zur Nutzung freigegeben wurde.

Damit war die Basis für eine breit angelegte Forschungstätigkeit u. a. zu Problemen des Wärmedurchgangs in Rekuperatoren, zu Geschwindigkeits- und Temperaturfeldern in Füllkörpersäulen, zur Entwicklung von Meßverfahren zur Mengenmessung strömender Flüssigkeit, der Wärmeleitfähigkeit und Zähigkeit von Gasen und zur Konstruktion und Entwicklung von Kreiselpverdichtern gegeben.

Über den Rahmen seiner Hochschultätigkeit hinaus war Hans Faltin, neben der 1953 erfolgten Zuwahl in die Deutsche Akademie der Wissenschaften, in einer Reihe von Ingenieurfachgremien sowohl auf theoretischen wie konstruktiven Teilgebieten des thermischen Energiemaschinenbaus beratend tätig. Höhepunkt dieser Tätigkeit war wohl, so Professor Boie in seinem Nachruf, der Bau der ersten 100 MW-Dampfturbine im Osten Deutschlands.

Als engagierter und den Studenten zugewandter Hochschullehrer war es sein Ziel, das von ihm in Forschung und Industrietätigkeit erprobte Prinzip der Einheit von Theorie und Praxis in der Lehre zu realisieren. In seinem Lehrbuch *Technische Wärmelehre* – daneben erschien noch das Lehrbuch *Meßverfahren und Meßgeräte der Kraft- und Wärmewirtschaft* – hat er diesem Gedanken Ausdruck verliehen: „Seltsamerweise bereitet aber gerade die Wärmelehre, wie der Verfasser an der Hochschule wie in der Praxis feststellen mußte, dem Studierenden wie dem praktischen Ingenieur ... die meisten Schwierigkeiten.“ Deshalb „war es nicht die Absicht des Verfassers, ein streng wissenschaftliches Buch ... zu schreiben, sondern vielmehr sind die wärmetechnischen Probleme (so) nahezubringen, daß er (der Student oder Ingenieur) den für die vorliegende technische Aufgabe richtungsgebenden und gestaltenden Sinn des wärmetechnischen Vorgangs zu erfassen und ihn praktisch auszuräumen in der Lage ist“.

Man kann den Wissenschaftler und Menschen nicht besser würdigen, als dies Professor Boie in seinem Nachruf tat: „Hans Faltin gehörte nicht zu jenen begnadeten Wissenschaftlern mit genialen Inspirationen. Alles, was er leistete und wodurch er sich einen guten Ruf im In- und Ausland erwarb, beruhte auf mühevoller Arbeit, Fleiß, Energie und Selbstüberwindung. Er war frei von Launen, Eitelkeit und Gel-

tungsbedürfnis, aber ehrgeizig und selbstbewußt, niemals jedoch anmaßend ... Immer stellte er sich in den Dienst der Gesamtheit und war den Studenten väterlicher Freund. Über welche Energie, Selbstüberwindung und Beherrschung er verfügte, erkennt man am besten daran, daß er noch 8 Tage vor seinem Tode einen seiner Doktoranden prüfte.“

Hans Faltin verstarb nach schwerer Krankheit am 28. Juni 1961.

Walther Pauer wurde am 1. April 1887 in Regensburg geboren. Nach dem Besuch des Humanistischen Alten Gymnasiums in Regensburg nahm er, wohl angeregt durch seinen Vater, der ehrenamtlich als Referent in den Wasser- und Gaswerken tätig war, 1907 ein Maschinenbaustudium in München auf. Er gehörte zu den fünf Studenten, die 1911 das Studium mit Auszeichnung abschlossen, und bekam zwei Angebote der Technischen Hochschule München für eine Assistentenstelle. Pauer nahm das Angebot nicht an, weil er es im Interesse seiner weiteren Entwicklung für unabdingbar hielt, zunächst in die Praxis zu gehen.



Hans Faltin
(29. September 1896 – 28. Juni 1961)



Walther Pauer
(1. April 1887 – 20. November 1971)

Er begann am 1. Oktober 1911 eine Tätigkeit bei MAN in Nürnberg als Berechnungsingenieur und spezialisierte sich bald auf dem Gebiet der wärmetechnischen Berechnung von Gegendruck- und Entnahmemaschinen, ein Problemkreis, der ihn sein Leben lang begleitete.

Eine Stellenanzeige in der VDI-Zeitschrift von Professor Nägel war für uns Dresdner insofern ein Glücksfall, als sich Walther Pauer darauf bewarb und 1913 als erster Assistent am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen bei Nägel seine wissenschaftliche Laufbahn begann. Neben dieser Tätigkeit lockte ihn besonders „Deutschlands größter Thermodynamiker“, Mollier nämlich. Der Erste Weltkrieg, der für Pauer mit zweimaliger Verwundung und Kriegsgefangenschaft in Frankreich verbunden war, unterbrach für sechs Jahre seine Ingenieur­tätigkeit. Es spricht für die Zielstrebigkeit der wissenschaftlichen Arbeit Pauers, daß er in dieser Zeit seine Promotion in Grundzügen (auf einer Rolle Toilettenpapier) fertigstellte.

Walther Pauer wurde 1920 als Adjunkt am Maschinenlabor der Technischen Hochschule Dresden bei Mollier wieder eingestellt und konnte nach intensiver Beschäftigung während seiner Kriegsgefangenschaft mit dem Thema *Betrachtungen über Gegendruck- und Entnahmemaschinen* mit Auszeichnung promovieren. Mit dieser Arbeit wurde ein Grundstein für die Energiewirtschaft als technische Wissenschaftsdisziplin gelegt, die die ingenieurtechnische Bewertung von Anlagen der Energieumwandlung mit ökonomischen Bewertungskriterien verbindet. Nach der Habilitation, einer Privatdozentur, der Ernennung zum außerordentlichen Professor für Kraft- und Wärmewirtschaft am 1. April 1922 und der Beauftragung mit der Betriebsüberleitung des Heizkraftwerkes der Technischen Hochschule Dresden wurde Walther Pauer am 1. April 1933, nach der Emeritierung von Mollier, als ordentlicher Professor für Angewandte Wärmelehre und Wärmewirtschaft berufen. Es spricht – das sei an dieser Stelle nur eingefügt – für die Verbundenheit Walther Pauers mit der Technischen Hochschule Dresden, daß er 1932 einen Ruf als ordentlicher Professor an die Technische Hochschule München ablehnte. Seine profunden Kenntnisse der Grundlagenwissenschaft wie auch übergreifender ingenieurtechnischer Anwendungen stellte Pauer in mehr als 30jähriger Lehrtätigkeit an unserer Hochschule in einem außerordentlich breiten Vorlesungsspektrum unter Beweis. Stellvertretend seien genannt: *Kraft- und Wärmewirtschaft* (ab 1952 *Energiewirtschaft*); *Heizung, Lüftung, Klimatisierung*; *Dampferzeugung*; *Krafterzeugung*; *Wärmetechnik*; *Technische Wärmelehre*; *Meßwesen*.

Sein wissenschaftlicher Ruf und spezielle Forschungsgebiete (u. a. Untersuchungen zur Flüssigkeitszerstäubung, die für Raketenantriebe verwendet wurden) waren Anlaß, Walther Pauer von 1946–1952 zu einer Tätigkeit in der Sowjetunion zu verpflichten. Von seiner Rückkehr bis zum Beginn seines Ruhestandes im Jahre 1958 stand er dem Institut für Energiewirtschaft der Technischen Hochschule Dresden vor.

Die von Pauer wesentlich mitbegründete energiewirtschaftliche Betrachtungsweise geht davon aus, „daß ... in Wirtschaftssystemen, die den freien Wettbewerb zulassen, die Gesetze der Wirtschaftlichkeit sorgfältig zu beachten“ sind. „Das ist aber nicht möglich, wenn der Ingenieur eine Anlage nach rein technischen Gesichtspunkten entwickelt und es dann dem Kaufmann überläßt, die Kosten festzustellen. Die Tatsache, daß Mängel in der Wirtschaftlichkeit nur sehr schwer feststellbar sind, verführt nur zu häufig den entwerfenden Ingenieur dazu, bei der Planung die Gesetze der Wirtschaftlichkeit nicht mit der gleichen Sorgfalt zu behandeln wie die technischen Anforderungen.“ Nach unserer Kenntnis war Walther Pauer auch der erste Technikwissenschaftler, der Ähnlichkeitskennzahlen auf ökonomischer Grundlage in die Bewertung energietechnischer Anlagen einbezogen hat.

Die von Pauer verfolgte komplexe Betrachtung energietechnischer Systeme erfordert ein hohes Maß an fundierten Kenntnissen sowohl in den ingenieurtechnischen wie auch wirtschaftswissenschaftlichen Fachdisziplinen. Er hat dies praktisch vorgelebt. Die Palette seiner Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen reicht von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur Primärenergieerschließung, zur Energieumwandlung in Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung, Energiespeicherung, Auslegung von Eindampfanlagen und Wärmeübertragern bis hin zur Wahl wirtschaftlicher Dämmmaßnahmen in Fernwärmeanlagen und im Bauwerksbereich. Seine nachfolgend zitierten Anforderungen an die Planung von Gebäuden aus dem Jahre 1960 dokumentieren diese komplexe Herangehensweise und könnten heute durchaus als Begründung für die Novellierung der Wärmeschutzverordnung geschrieben worden sein: „Die besondere Schwierigkeit der wirtschaftlich richtigen Auslegung besteht darin, daß Bau und Heizung keine technische Einheit mehr darstellen, die vom Baumeister geplant und ausgeführt wird, sondern daß mit fortschreitender Spezialisierung Bau und Heizungsanlage unabhängig von verschiedenen Stellen entworfen und ausgeführt werden ... Es ist schwer verständlich, daß zwar ungeheure Mittel aufgewandt werden, um unsere schon nahe bis zur erreichbaren Grenze entwickelte Kraftmaschine weiter zu verbessern, daß aber ... sehr wenig getan wird, um die viel größeren, aber leichter einzudämmenden Wärmeverluste bei der Raumheizung zu senken.“

Es ist charakteristisch für Pauer, daß er sich unermüdlich in zahlreichen Gremien und mit einer Vielzahl von Publikationen für die Umsetzung dieser Ideen in der Ingenieurpraxis eingesetzt hat. Hervorzuheben ist dabei besonders die im Verlag Steinkopff zunächst von Nägel und ihm und nach 1952 allein von ihm herausgegebene Reihe *Wärmelehre und Wärmewirtschaft in Einzeldarstellungen*. Der Band 14 *Einführung in die Kraft- und Wärmewirtschaft* – sein Lebenswerk – stellt, obwohl letztmalig 1971 gedruckt, noch heute ein Standardwerk der Energiewirtschaft dar.

Nach langer Krankheit verstarb Walther Pauer am 20. November 1971. Er war Zeit seines Wirkens an unserer alma mater ein Hochschullehrer, der die Lehre nicht schlechthin als Beruf, sondern als eine Berufung auffaßte.

Es wird heute angesichts drastisch gesunkener Studentenzahlen in den technischen Disziplinen heftig darüber diskutiert, was Studenten für die Wahl eines Studienfaches motiviert.

Dazu zählen in unserer Zeit sicher der Blick auf den *aktuellen* Arbeitsmarkt – nicht aber eine azyklische Beobachtung –, ein breites Fächerspektrum sowohl in den Fakultäten wie fakultätsübergreifend, die Ausgewogenheit von Grundlagen- und angewandten Disziplinen und selbstverständlich auch der Hochschulstandort selbst.

Nicht zuletzt aber zählt dazu die Leistung von Wissenschaftlerpersönlichkeiten von hoher fachlicher Kompetenz und mit einer Lehrauffassung, die menschlichen Kontakt zu den Studenten und Mitarbeitern einschließt.

Ich möchte deshalb die kurze und sicher sehr unvollkommene Bilanz des Wirkens zweier Wissenschaftler, die wesentlichen Anteil an der Entwicklung unserer Hochschule in den schweren Jahren nach dem Zweiten Weltkrieg besaßen, nicht schließen, ohne die diesbezüglich beiden gemeinsamen Eigenschaften zu nennen. Es sind:

- Fachwissen auf höchstem wissenschaftlichen Niveau verbunden mit einem praktischen Ingenieursachverstand
- der Blick für benachbarte Fachdisziplinen, Integrationsfähigkeit und interdisziplinäre Arbeit
- die Unterordnung persönlicher Interessen zugunsten des Gemeinwohls
- die vorbehaltlose Weitergabe des Fachwissens an junge Wissenschaftler und Studenten verbunden mit einer durch persönliche Nähe getragenen Förderung und Forderung sowie
- persönliche Integrität und menschliche Wahrhaftigkeit.

Wolfgang Fratzscher

Die Sektion für Maschinenbau an der Deutschen Akademie der Wissenschaften

Hans Faltin und Walther Pauer verbindet nicht nur, gemeinsam als Hochschullehrer in Dresden gewirkt zu haben. Sie waren beide auch Mitglied der Deutschen Akademie der Wissenschaften, also einer der Vorgängerakademien der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften.

Hans Faltin wurde auf Vorschlag des Rektors der Technischen Hochschule Dresden – der neben Faltin auch die Herren Schwabe, Simon, Eisenkolb und Frühauf für die Aufnahme in die Akademie vorschlug – am 19. Februar 1953 zum ordentlichen Mitglied in die Deutsche Akademie der Wissenschaften gewählt. Der Vorschlag zur Wahl Faltins wurde von Binder unterstützt – und zwar mit einem Schreiben, das außer Faltins Namen ganze zehn Zeilen umfaßte! Die Wahl sollte für die Klasse Technische Wissenschaften erfolgen, die dann aber nicht gegründet wurde. Die Zuordnung erfolgte somit zur Klasse Mathematik, Physik und Technik. Walther Pauer wurde nach seiner Rückkehr aus der UdSSR am 24. Februar 1955 aufgrund eines Zuwahlvorschlages von Jante zum ordentlichen Mitglied der Akademie gewählt.

Die Mitarbeit beider Kollegen in der Akademie vollzog sich dann hauptsächlich in der Sektion für Maschinenbau, die nach dem Statut der Akademie vom 17. Juni 1954 als eine Untergliederung der Klasse eingerichtet wurde und über zehn Jahre Bestand hatte, bis sie im Rahmen der Akademiereform 1968 wieder aufgelöst wurde [1]. Die Sektion tagte in Dresden im Professorenheim. Ihr gehörten zum Gründungszeitpunkt neben den Akademiemitgliedern aus Dresden fast die gesamte Professorenschaft der Maschinenbaufakultät an sowie Christian aus Freiberg und drei Vertreter aus der Industrie (Gläser, Wirth, Kruse). Boesler konnte aufgrund seiner ungünstigen Wohnungslage an der Arbeit der Sektion nicht teilhaben. Vorgeschlagen war ursprünglich Pauer als Vorsitzender der Sektion, der aber wegen Arbeitsüberlastung ablehnte. Daraufhin übernahm Jante den Vorsitz, und Pohlentz wurde zum Referenten gewählt. Die Gründung der Sektion für Maschi-

nenbau wurde am 8. Dezember 1955 beschlossen. Die konstituierende Sitzung fand am 20. Januar 1956 in Berlin, die erste Arbeitssitzung am 8. Februar 1956 in Dresden statt. Man wollte sich jeden zweiten und vierten Mittwoch im Monat treffen. Ein Arbeitsbericht aus dem Jahre 1967 zeigt, daß diese Veranstaltungen offensichtlich auch mit großer Konsequenz durchgeführt worden sind. Der Arbeitsbericht weist 75 Vorträge aus, die die gesamte Breite des Maschinenbaus widerspiegeln, darüber hinaus neun Exkursionen. Über die Arbeit der Sektion wurden 20 Abhandlungen bzw. Mitteilungen publiziert. Außerdem nahm die Sektion drei Reiseberichte von Mitgliedern entgegen. Als positiv wurde hervorgehoben, daß innerhalb der Sektion ein Austausch von Veröffentlichungen mit entsprechenden Erläuterungen erfolgte. In dieser Form gab es in der Berliner Akademie bis 1968 ein eigenständiges technisches Forum, das erst kurz vor der Wende wieder als Klasse eingerichtet wurde. Die heutige Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften hat eine eigene Technikklasse mit einem breiteren Profil. Diese fühlt sich für den Vorläufer und seine Mitglieder verantwortlich und möchte, insbesondere in Vorbereitung auf die 300-Jahr-Feier im Jahr 2000, deren Geschichte aufarbeiten. So hat die BBAW gern die Gelegenheit ergriffen, mit einem Ehrenkolloquium an Hans Faltin und Walther Pauer zu erinnern.

Literatur

- [1] Die Bemerkungen zur Sektion Maschinenbau der AdW und zur Mitarbeit von Faltin und Pauer in der Akademie entstammen dem Akademiearchiv. Sie wurden freundlicherweise von Dr. Knobloch herausgesucht und aufgearbeitet. Dafür herzlichen Dank.

Wolfgang Fratzscher

Gedanken zum Wirken von Hans Faltin

Im Mittelpunkt meiner Ausführungen soll die Frage stehen, welchen Einfluß Hans Faltin auf die technische Ausbildung in der Sowjetischen Besatzungszone (SBZ) und später in der DDR ausgeübt hat. Ich nähere mich diesem Problemkreis von zwei Ansatzpunkten – einem regionalen und einem substantiellen, fachlichen.

Halle und die Technik – ein Intermezzo

Zunächst zu dem regionalen Gesichtspunkt: Bekanntlich ist unser Fachbereich Verfahrenstechnik nach der Auflösung der Technischen Hochschule Merseburg der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg angegliedert worden. Deshalb war es für uns von Interesse, den kurzen Hinweisen in Faltins Lebenslauf nachzugehen, nach denen er im Herbst des Jahres 1945 als Hochschullehrer an der Hallenser Universität tätig war. Tatsächlich wurden wir hierzu im Universitätsarchiv fündig [1]. Die Naturwissenschaftliche Fakultät der Martin-Luther-Universität trug sich damals mit dem Gedanken, technische Studiengänge einzurichten. An der naturwissenschaftlichen Fakultät war zu dieser Zeit ein Physiker Dekan – Prof. Dr. Brandt –, übrigens ein Schüler von Sommerfeld aus dessen Aachener Zeit. Räumlich sollte die technische Ausbildung auf dem Gelände der Heidekaserne in Halle untergebracht werden. Über dieses Vorgehen erhielt ich schon vor längerer Zeit eine persönliche Information von Heinz Bethge, dem Altpräsidenten der Leopoldina. So kam es der Fakultät entgegen, daß sich zu diesem Zeitpunkt Hans Faltin der Provinzregierung zur Anstellung anbot, der nach amerikanischer Internierung in Sangerhausen wohnte, dem Wohnort seiner verstorbenen Eltern, wo sich seit dem Januar 1945 – dem Zeitpunkt der Erklärung Breslaus zur Festung – seine Frau mit den drei kleinen Kindern aufhielt. Faltin hatte letztmalig im Mai 1945 Gehalt von der Technischen Hochschule Brünn erhalten, an der er seit 1943 als Ordinarius

angestellt gewesen war. Aufgrund seines Militärdienstes hatte er seinen Verpflichtungen in Brünn allerdings nicht nachkommen können. Als preußischer Staatsbeamter auf Lebenszeit fühlte er sich nun zu einem Angebot an die Provinzregierung verpflichtet. Nach einigem Hin und Her, das wohl auch der Administration geschuldet war und die ständige Interventionen der Fakultät erforderte, kam die Anstellung zustande. Sie wurde jedoch kurzfristig zum 18. Dezember 1945 gekündigt mit dem Hinweis auf seine NSDAP-Mitgliedschaft, obwohl Faltin schon im September eine uns heute anrührende diesbezügliche Erklärung abgegeben hatte. Für uns ist interessant, daß Faltin in einem der Protestschreiben darauf hinwies, daß er alle Vorbereitungen eingeleitet habe, um zu gegebener Zeit an der Universität mit der Ausbildung in den Studiengängen Maschinenbau, Elektrotechnik, Hoch- und Tiefbau (an anderer Stelle Architektur und Bauingenieurwesen) beginnen zu können.

Aus heutiger Sicht läßt sich sagen, daß es in vielerlei Hinsicht nützlich und sinnvoll gewesen wäre, wenn wenigstens einige Teile dieser Vorstellung Realität geworden wären. Es hätten so manche Umwege der Entwicklung mit entsprechenden materiellen Konsequenzen und geistigen Verbiegungen vermieden werden können. Vielleicht wäre – mit Vorlauf! – ein Gegenpol zu der verengten Ausbildung an den Spezialhochschulen entstanden, die dann in den 50er Jahren gegründet wurden. So hat die Hallenser Universität de facto erst 50 Jahre später technische Studiengänge – Verfahrenstechnik und Werkstoffingenieurwesen –, und zwar nicht auf eigenen Wunsch, zugeordnet bekommen.

Soweit der regionale Bezug. Nun zu dem mehr systematischen Anliegen, vordergründig aus der Sicht der Verfahrenstechnik, deren Entwicklung wir in Merseburg allgemein und natürlich auch speziell in der DDR versucht haben nachzuzeichnen.

Von der Konstruktion zur Technologie – Wärmetechnik als Geburtshelfer der Verfahrenstechnik

Nach seinem Ausscheiden aus der Universität Halle fand Faltin schon am 10. Januar 1946 eine neue Tätigkeit als Abteilungsleiter der Berechnungsabteilung des Konstruktions- und Ingenieurbüros Leuna. Zum 1. April 1947 wechselte er zum Chemiewerk Leuna als Leiter des wärmetechnischen Versuchslaboratoriums [2]. Diese Tätigkeit nahm er bis zu seiner Berufung nach Dresden, die am 1. Oktober 1949 erfolgte, wahr. In dieser Zeit lernte er die technischen Probleme der chemischen Industrie kennen und schätzen und gewann so eine Einstellung zur chemischen Technik oder zu dem, was nach Diskussionen im VDI seit Mitte der dreißiger Jahre als Verfahrenstechnik bezeichnet wurde, obwohl er an der traditio-

nellen Bezeichnung, z. B. für sein Versuchslaboratorium, festhielt, denn die Benennung ist sicher mit seinem Einverständnis vorgenommen worden.

Dazu muß man bedenken, daß Faltins wissenschaftliche Ausbildung, seine eigene wissenschaftliche Arbeit in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts lag, die aus unserer Sicht als das Zeitalter des Siegeszuges der Wärmetechnik bezeichnet werden kann. Die prinzipielle technische Orientierung durch Zeuner und die fundamentalen Erkenntnisse durch Nusselt ermöglichten, sowohl für den Entwurf wie für den Betrieb wärmetechnischer Anlagen quantitative Vorschläge zu machen, die enorme wirtschaftliche Bedeutung hatten.

Mir fiel kürzlich ein Halbjahresband der Wärmestelle des Vereins deutscher Eisenhüttenleute von 1927 in die Hände, dessen Profil u. a. in starkem Maße durch Schack und Rummel geprägt worden ist [3]. Es ist interessant, daß, grob geschätzt, rund ein Drittel der Arbeiten Probleme der Wärmeübertragung betrifft, ein weiteres Drittel wärmetechnischen Meßverfahren zugeordnet werden kann und das letzte Drittel Arbeiten umfaßt, die etwa der Überschrift Wärmewirtschaft zugerechnet werden können. Dieses Spannungsfeld kennzeichnet die damaligen Aufgaben des Wärmeingenieurs:

1. den Wärmefluß durch die Anlage zu berechnen und die Apparate zu dimensionieren und
2. durch eine umfassende Meßtechnik den Betrieb der Anlagen experimentell, d. h. real zu bewerten, so daß
3. Vorschläge zur Verbesserung des Betriebes und zur Einsparung an Anlagekosten unterbreitet werden können.

Gerade die Beiträge zum letzten Punkt, zur Wärmewirtschaft, sind manchmal geprägt von einer gewissen Überraschungshaltung oder einem Erstaunen der Verfasser über das wirtschaftliche Gewicht der Vorschläge, die auf der Basis wärmetechnischer Berechnungen und Messungen gemacht werden konnten. Wenn man eine solche Haltung schon beim Fachmann spüren kann, um wieviel mehr müssen diese Ergebnisse Fachleute anderer Disziplinen und Laien beeindruckt haben! Auf einer solchen Grundlage eine Aufgeschlossenheit gegenüber technischen Sachverhalten in der Gesellschaft zu erzielen, ist sicher nicht schwer.

Aus dieser Grundeinstellung heraus hat Faltin wohl das wärmetechnische Versuchslaboratorium geprägt. Aus dieser Institution ging später einmal die verfahrenstechnische Abteilung hervor, die u. a. mit den Namen Blauhut und Adolphi verbunden ist. In Leuna hat Faltin Untersuchungen und Berechnungen durchgeführt, die auch durch entsprechende Forschungsberichte im Leuna-Archiv belegt sind. Niederschlag haben diese Ergebnisse außerdem in seiner Antrittsvorlesung an der Technischen Hochschule Dresden gefunden, die er unter dem Thema *Thermodynamische und strömungstechnische Probleme bei der technischen Durchführung*

von *Kontakt-Reaktionen* am 28. April 1950 gehalten hat. Auch das Forschungsprofil seines Institutes wurde in den ersten Jahren nach seiner Berufung in starkem Maße durch seine Leunaer Erfahrungen geprägt. Arbeiten in Dresden und Doktorarbeiten, die in Leuna angefertigt wurden, zeigen das deutlich. Hier sei nur an einige Namen erinnert wie Cramer, Speck, Renker, Kattaneck, Sonntag u. a. Es ist hier nicht die Absicht und der Platz, auf die Ergebnisse aller dieser Arbeiten einzugehen, das ist auch schon an anderer Stelle geschehen, stattdessen soll versucht werden, einige Probleme der Strukturierung von Wissenschaftsdisziplinen und damit der Wissenschaftsentwicklung aufzuzeigen.

Die Entlassung in Halle und die Arbeit in Leuna waren wohl die gewichtigsten Erfahrungen, die Faltin in der Zeit von 1945–1949 gemacht hat. Und so ist es nicht verwunderlich, daß er in einem Schreiben vom 14. Dezember 1948 an Jante genau diese beiden Punkte anspricht, nachdem dieser am 10. Dezember 1948 erstmals die Anfrage wegen einer Berufung nach Dresden an ihn gerichtet hatte [4]. Wie wir wissen, sind diese Bedenken ausgeräumt worden, und die Berufung ist zustande gekommen.

Im Zusammenhang mit der Berufung listet Faltin die Verhandlungsgegenstände auf. Das betrifft an erster Stelle die Thermodynamik und danach sofort die Meßverfahren. Beide Disziplinen hat er dann auch vertreten und damit die Verantwortung übernommen, die Dresdener Thermodynamik-Schule weiterzuführen, die auf Zeuner und Mollier zurückgeht und die durch die Abwesenheit von Walther Pauer zu dieser Zeit nicht mehr existent war. Unmittelbar vor Faltin hatte Jante die Thermodynamik vertreten. Seine Auffassung zu diesem Fach hat er bekanntlich in einem kleinen Buch niedergelegt [5], dem wir zu unserer Arbeit die eine oder andere Anregung entnehmen konnten.

Über Faltins Auffassung zu den Fächern informieren seine Bücher, die in mehreren Auflagen [6, 7, 8] erschienen sind. Von den *Meßverfahren* [9] existiert neben der deutschen auch eine ungarische Ausgabe. Für den vorliegenden Zusammenhang ist wichtig, daß Faltin schon im Vorwort zur ersten Auflage seines Wärmelehrebuches ausführlich auf die Anwendung dieses Fachgebietes zur Lösung verfahrenstechnischer Aufgaben eingeht, wie er auch im Vorwort zu den Meßverfahren die chemische Industrie explizit anspricht. Auch in seinen Lehrveranstaltungen zur Thermodynamik kam seine Erfahrung zum Ausdruck. Im dritten Semester seiner Thermodynamikvorlesung spielte die Thermodynamik der Gemische eine wesentliche Rolle, in den Übungen wurde eine Chemieanlage ausgelegt. Das begann mit der Ermittlung der spezifischen Wärmekapazitäten und der Stoffwerte, ging dann über die Stoff- und Energiebilanzen bis zur Berechnung der grundlegenden Apparategrößen.

Der mit den üblichen Strukturen eines Maschinenbaustudiums gegebene Raum für eine Ausbildung in der Richtung, die Faltin in Leuna kennengelernt hatte, schien

ihm aber nicht auszureichen. So forderte er noch vor den Lehrgebieten Heizung und Lüftung sowie Dampfkessel und Dampfturbinen und Turbokompressoren die Verantwortung für ein Lehrgebiet Verfahrenstechnik. Offensichtlich wurde ihm aber zunächst die Verantwortung für die Gebiete Dampfturbinen und Kreiselerdichter übertragen, was ihm auch aufgrund seiner bisherigen Arbeiten in Breslau sehr entgegen kam. Wie uns Älteren bekannt ist, hat er sich auch mit dem ihm eigenen Engagement diesen Gebieten gewidmet. Die weitergehende Institutionalisierung der Verfahrenstechnik hat Faltin aber nicht aus dem Auge verloren. Schon am 24. April 1950 schlug er die Erweiterung des Institutes für Thermodynamik in Richtung Technik chemischer Verfahren vor und die Einrichtung einer Fachrichtung Chemie-Ingenieur. Für diese entwarf er zum gleichen Zeitpunkt einen Studienplan. Außerdem schlug er die Berufung eines Professors mit Lehrstuhl für das Gebiet Technik chemischer Verfahren vor und unterbreitete der Fakultät einen personellen Vorschlag, nämlich Johannes Boesler, der am 10. April 1950 schließlich sein prinzipielles Einverständnis gab. In diesem Schreiben wird mit der von Boesler bekannten Art eine Einschätzung der Situation in Deutschland gegeben: „Besonders knapp sind die Verfahrenstechniker, da wir in Deutschland diese Species nicht ausbildeten. Der einzige Lehrstuhl von Kirchbaum in Karlsruhe wollte das zwar tun, aber es ist nur beim Namen geblieben. Es wäre wirklich eine dankenswerte Aufgabe, wenn Sie sich dieser Sache annehmen würden ...“.

Offensichtlich hatte es bereits in der Fakultät Diskussionen gegeben, z. B. konnte Boesler nicht auf Publikationen verweisen, so daß nach weiteren potentiellen Kandidaten gesucht wurde, u. a. wurde auch Dr. Blauhut von Leuna angesprochen. Aber alle Bemühungen schlugen fehl, so daß der Berufungsausschuß, bestehend aus E. Heidebrock, dem Anorganiker A. Simon und Faltin selbst, am 10. Juli 1951 den Vorschlag Boesler nachdrücklich wiederholte. Der Ausschuß folgte dabei wohl der Intention von Faltin, daß für diesen Lehrstuhl in erster Linie ein Maschinenbauer mit jahrelanger praktischer Erfahrung in der Chemie und im Chemieanlagenbau zu fordern wäre.

Zum 18. Dezember 1951 stimmte das zuständige Ministerium der DDR der Einrichtung eines Institutes und der Fachprofessur für Verfahrenstechnik zu. In Weiterführung des ersten Vorschlages war nun ein eigenständiges Institut vorgesehen. An der gemeinsamen Unterbringung im künftigen Merkelbau wurde aber festgehalten. Boesler wurde von seiner Firma zunächst nicht freigegeben, so daß sich die Verhandlungen hinzogen. Er wurde deshalb zum 31. Dezember 1952 zum Professor mit Lehrauftrag berufen und erst nach Intervention der Fakultät zum 23. Juli 1953 zum Professor mit Lehrstuhl. Damit konnte zum Herbstsemester 1953 der vollständige Lehr- und Übungsbetrieb in einer Fachrichtung Verfahrenstechnik an der Fakultät für Maschinenwesen aufgenommen werden.

Damit kommt Faltin aus dem Blickwinkel der Verfahrenstechnik der DDR die gleiche Rolle zu, wie sie Rudolf Plank für die Verfahrenstechnik in Deutschland gespielt hat. Dessen Initiative hatte zum ersten Lehrstuhl für Verfahrenstechnik in Karlsruhe geführt, der bekanntlich 1928 mit Kirchbaum besetzt worden ist. Faltin kann für sich in Anspruch nehmen, den zweiten Lehrstuhl und das erste Institut sowie die entsprechende Fachrichtung nach dem Zweiten Weltkrieg initiiert und aus der Taufe gehoben zu haben. Damit ist neben den mehr konstruktiv orientierten Fachrichtungen Kraft- und Arbeitsmaschinen, für die Faltin selbst verantwortlich zeichnete, sowie Strömungsmaschinen und Verbrennungsmotoren und Kraftfahrzeuge zum ersten Male eine mehr technologisch orientierte Fachrichtung etabliert worden. Auf diese Weise ist eine Entwicklung eingeschlagen worden, die bei der damaligen Position zur Technologie erstaunlich war. Wahrscheinlich war man sich dieses Umstandes explizit nicht bewußt.

Mit der Fachrichtung Wärmetechnik hatte es wohl auch schon eine besondere Bewandnis. Ursprünglich unter dem Gesichtspunkt der Konstruktion von Dampfkesseln gesehen, waren doch unter dem Einfluß wärmetechnischer und wärmewirtschaftlicher Untersuchungen technologische Elemente in dieser Fachrichtung enthalten. H. Rummel hat einmal gesagt, daß der Wärmeingenieur zur Hälfte seines Wesens Meßingenieur sei, um die Eigenschaften und das Verhalten technischer Anlagen zu erfassen. Das unterstützt die Feststellung, daß technologische Elemente in die Ausbildung einfließen.

Ein langer Streit – die Methode der Technik

Die Thermodynamik war die Basis für alle „warmen“ Fachrichtungen des Maschinenbaus. Deshalb nahmen die entsprechenden Vorlesungen einen zentralen Platz in den Studienplänen ein. Die Person Faltins war Gewähr dafür, daß die Studenten diese Vorlesungen auch entsprechend ernst nahmen. Aus diesem Grund muß den Lehrveranstaltungen von Faltin nicht nur ein Bildungswert, sondern in starkem Maße ein erzieherischer Wert beigemessen werden. Wir wollen an dieser Stelle deshalb nicht nach der Vermittlung konkreten Fachwissens fragen, das ist an anderer Stelle schon geschehen, sondern nach Elementen und Grundpositionen, die in erzieherischer Weise auf die Studenten wirken und damit einen Beitrag zur Berufsauffassung oder – hochgestochen – zur Ingenieursethik liefern. An der Person, an dem Lebensweg und an den wissenschaftlichen Äußerungen von Hans Faltin können u. a. auch Aspekte des Verhältnisses zwischen Naturwissenschaft und Technik aus der Sicht der Technik verdeutlicht werden, wie sie sich etwa in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts ausgeprägt haben. Diese Aspekte tragen vielleicht in

mancherlei Hinsicht Mitverantwortung für die Akzeptanzprobleme, die die Technik heute in der Gesellschaft hat.

Obwohl Faltin in den Schatten der Dresdner Thermodynamik-Schule trat und Zeuner bekanntlich sein grundlegendes Lehrbuch ab der dritten Auflage *Technische Thermodynamik* nannte, blieb Faltin bei seinem Lehrbuch bis zur vierten Auflage, die 1961 erschien, bei der Bezeichnung *Technische Wärmelehre*, also bei dem Titel, den er schon für die erste Auflage 1948 verwendet hatte. Diese Tatsache scheint Ausdruck einer bestimmten Geisteshaltung gewesen zu sein. Das wird auch dadurch unterstrichen, daß sein Lehrer Herbert Baer sein Thermodynamikbuch, das er 1952 herausgab, mit dem Titel *Angewandte Wärmelehre für Maschinenbauer* [10] versah – aus heutiger Sicht eine Einschränkung, die an drei Stellen zu ändern wäre. Offensichtlich war man von Seiten der Techniker bemüht, deutlich zu machen, daß man dem Naturwissenschaftler nicht „ins Handwerk pfuschen“ wollte. Dieser Tendenz folgt auch die in starkem Maße von Faltin initiierte Diskussion um die Einführung des MKSA-Systems und die Überwindung des technischen Meßsystems. Faltin äußerte hier schwere Bedenken, wie aus dem Vorwort zur vierten Auflage seines Thermodynamikbuches hervorgeht.

Diese Positionen scheinen der äußere Ausdruck einer Geisteshaltung zu sein, die mit Beginn dieses Jahrhunderts geprägt worden war, wohl in der Absicht zu verdeutlichen, daß die Technik eben mehr sei als angewandte Naturwissenschaft und auch über ein eigenständiges methodisches Instrumentarium verfügen müsse. Exponent einer solchen Auffassung war der zeitweilige Vorstand der Abteilung Maschinenbau und Rektor der Berliner Technischen Hochschule, Riedler, der in den Ingenieurdisziplinen eine Antimathematik-Bewegung zustande bringen wollte [11]. Diese Entwicklung hat in der Berliner Hochschule die stärksten Ausprägungen erfahren. So erzählte mir Pauer, daß z. B. die Herausgabe der ersten Auflage des Lehrbuches zur Wärmeübertragung Gröber fast seinen Lehrstuhl gekostet hätte, weil er sich bei der instationären Wärmeleitung in einer dem Ingenieur nicht angepaßten Weise der Mathematik bedient hatte. Es scheint deshalb nicht zufällig, daß Faltin im Vorwort zur ersten Auflage der Wärmelehre äußert: „Es war nicht die Absicht des Verfassers, ein streng wissenschaftliches Buch über die theoretische Thermodynamik zu schreiben ...“, und weiter, „es gibt verhältnismäßig wenig Ingenieure, die wärmetechnische Aufgaben ohne Mühe zu lösen vermögen. Die Gründe dafür scheinen einestheils in der allzu theoretischen und abstrakt mathematischen Behandlung des Stoffes an den technischen Schulen und in den meisten Lehrbüchern zu liegen, anderenteils aber auch in einer gewissen Abneigung gegen rechnerische Betätigung, sei es aus mangelnder Geübtheit in der Anwendung des mathematischen Rüstzeuges, sei es aus Mangel an hinreichenden Kenntnissen der höheren Mathematik überhaupt ...“.

Diese Kritik am Leser schränkt Faltin aber selbst sofort wieder ein, indem er bemerkt: „Die mathematischen Entwicklungen wurden auf das unumgängliche Maß beschränkt, dafür aber die Ableitungen so vollständig durchgeführt, daß auch der mit bescheidenen Kenntnissen der höheren Mathematik ausgerüstete Leser ihnen folgen kann.“

Es ist jedem von uns hinlänglich bekannt, daß Bemerkungen dieser Art in Vorworten zu vielen Lehrbüchern zu technischen Gegenständen zu finden sind. Auch im Lehrbuch von Norbert Elsner [12] kann man im Vorwort den beruhigenden Satz lesen: „Der im Buch verwendete mathematische Apparat beschränkt sich auf die Grundlagen der Differential- und Integralrechnung, ergänzt durch einige Elemente aus der Theorie der gewöhnlichen und partiellen Differentialgleichungen.“ Faltin ist hier also keine Ausnahme, sondern die Regel. Der Vollständigkeit halber sei bemerkt, daß diese Äußerungen wohl mehr an die Öffentlichkeit gerichtet als daß sie Ausdruck eigener Positionen waren. Vielmehr hatte man in seinen Vorlesungen häufig den Eindruck, daß Faltin qualitative und verbale Passagen zu vermeiden suchte und manchmal fast unangebracht schnell in die Rechnung flüchtete. In seiner Wärmelehre III leitete er die Nusselt-Kriterial-Beziehung mit Hilfe der Grenzschichttheorie mit der ausdrücklichen Bemerkung ab, daß er auf diese Weise deutlich machen wolle, wie bedeutungsvoll die Mathematik auch in der Wärmelehre sei – als Adressat war die Strömungsmechanik gedacht. Wenn er die umfangliche Ableitung vollendet hatte, setzte er kokettierend den Kneifer auf, um im Manuskript die Richtigkeit seiner Ergebnisse zu überprüfen. Auch seine Überlegungen zur Wohlschen Zustandsgleichung erlaubten Faltin, umfangliche Rechnereien anzustellen. Die mühevollen Rechnungen zur Aufstellung von Beziehungen für die spezifischen Wärmekapazitäten mit Polynomansätzen bis zur fünften Potenz zählen gleichfalls zu diesen Grundpositionen.

Andererseits war es zu jener Zeit unabdingbarer Bestandteil der Ingenieurkenntnisse, über konkrete Vorstellungen von Zahlen und Größenordnungen von Zahlenwerten zu verfügen, um praktisch aus dem Stand – oder mit Boesler: auf einen Sitz – sofort quantitativ einigermaßen abgesicherte Antworten geben zu können. Auch hierzu lassen sich bei Faltin Beispiele finden. So enthält sein Lehrbuch Angaben zu Größenordnungen von Wärmeübergangszahlen, an denen er, wenn auch in geringerem Umfang, bis zur vierten Auflage festhielt. In seinen Vorlesungen versäumte er nicht, darauf hinzuweisen, daß zur Zeit seiner Ausbildung nichts anderes bekannt war als einige Zahlenangaben zu Wärmeübergangszahlen, die für ganz konkrete Gegebenheiten ermittelt worden waren.

Und schließlich noch ein Wort zu Person und Charakter Faltins. Diskussionen, die ich im Vorfeld dieser Veranstaltung mit Kollegen geführt habe, die Faltin persönlich kannten, förderten sofort eine Vielzahl von Anekdoten und Erinnerungen zutage. Die Bemerkungen zu seinem kurzen Halleschen Intermezzo, zur Entwick-

lung der Verfahrenstechnik und zur Rolle der Quantifizierungsstrategien in der Technik charakterisieren die Person Faltins gleichfalls in vielerlei Hinsicht. Aus der Sicht des damaligen Studenten kann ich sagen, daß er uns als die absolute Autorität in unseren Bereichen erschien – sozusagen als die letzte Instanz. Dazu trug in hohem Maße seine Disziplin, in erster Linie gegenüber sich selbst, bei. Sein Verhalten als Staatsbeamter nach dem Krieg war dafür charakteristisch. Die Studenten bekamen es deutlich zu spüren dadurch, daß er wichtige Vorlesungen montags und sonnabends von 7 bis 9 Uhr ansetzte, die man leidvollerweise auch besuchen mußte. Sein Disziplinbegriff forderte von ihm selbst, daß er übernommene Verpflichtungen und Verantwortlichkeiten in Gänze, d. h. auch inklusive der Äußerlichkeiten, wahrnahm. So trug er zur 125-Jahr-Feier der Technischen Hochschule Dresden 1953 als Senator den Talar mit Würde, d. h. mit weißen Handschuhen. Wie ernst er die Berufung in die Akademie der Wissenschaften nahm, zeigt allein schon die Tatsache, daß er seine Mitgliedschaft in seinen Büchern dem Autorennamen anfügte. Unter Disziplin verstand er aber auch die Verpflichtung, Forschungsergebnisse, die er z. B. in Qualifikationsarbeiten kennengelernt hatte, unverzüglich in sein Lehrbuch aufzunehmen. Sein Arbeitspensum war hoch – im Winter für Außenstehende daran erkennbar, daß er bereits früh und abends noch immer mit seinem Wehrmantsmantel im Zeunerbau auffiel.

Abschließen möchte ich mit einem Hinweis, der gleichfalls Faltins Auffassung von einem Ingenieur kennzeichnet. Als er sein Direktorenzimmer im neu errichteten Merkel-Bau bezog, legte er Wert darauf, daß in diesem Zimmer ein großes Zeichenbrett aufgestellt wurde als materielle Basis für mögliche Meinungsäußerungen eines Technikers.

So hat Hans Faltin Spuren hinterlassen und wird als Hochschullehrerpersönlichkeit in Erinnerung bleiben, die beispielhaft für die Auffassung des alten Akademikers aus dem Buch *Der Lehrstuhl* von Grekova [13] stehen könnte, daß es nämlich viel wesentlicher ist, *wer* einen Gegenstand *wie* vermittelt, als *was* der Gegenstand selbst beinhaltet. Auf diese Weise hat Faltin eine Generation von Mitarbeitern und mehrere Studentengenerationen geprägt. Darüber hinaus hat er sich bleibende Verdienste erworben durch die Initiierung der Entwicklung der Verfahrenstechnik – einer Ingenieurdisziplin, die sich vom Gegenstand aber auch von der Methode deutlich von dem unterschied, was im weiten Gebiet der Wärmetechnik in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts prägend war und von Faltin sein gesamtes Leben vertreten wurde.

Literatur und Anmerkungen

- [1] Unterlagen aus dem Archiv der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- [2] Unterlagen aus dem Werksarchiv der Leuna-Werke.
- [3] Verein deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf: Wärmestelle, Band I, Juli 1927.
- [4] Unterlagen aus dem Archiv der Technischen Universität Dresden und der Fakultät für Maschinenwesen.
- [5] Jante, A.: Leitfaden der technischen Thermodynamik, Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1950.
- [6] Faltin, H.: Technische Wärmelehre, Halle (Saale): Verlag von Wilhelm Knapp, 1948, 135 Abb., 7 Tafeln und Zahlentafeln, 261 S.
- [7] Faltin, H.: Technische Wärmelehre, 2. Auflage, Halle (Saale): VEB Wilhelm Knapp Verlag, 1953, 153 Abb., 10 Tafeln und Zahlentafeln, 369 S., Beilage Aufgabensammlung (zusammen 522 S.).
- [8] Faltin, H.: Technische Wärmelehre, 4. erweiterte Auflage, Berlin: Akademie Verlag, 1961, 244 Abb., 23 Tabellen, 8 Tafeln, 430 S., Beilage Aufgabensammlung (zusammen 587 S.).
- [9] Faltin, H.: Meßverfahren und Meßgeräte der Kraft- und Wärmewirtschaft, Halle (Saale): Verlag von Wilhelm Knapp, 1950, 492 Abb., 639 S.
- [10] Baer, H.: Angewandte Wärmelehre für Maschinenbauer, München: Verlag von R. Oldenbourg, 1952, 105 Abb., 191 S.
- [11] Peukert, W. & S. Hensel: Zur Rolle der Mathematik bei der Entwicklung der Technikwissenschaften (2. Teil). In: Dresdener Beiträge zur Geschichte der Technikwissenschaften, Heft 14 (1987), S. 68/93.
- [12] Elsner, N.: Grundlagen der Technischen Thermodynamik, Band 1 Energielehre und Stoffverhalten, 8. Auflage, Berlin: Akademie Verlag, 1992.
- [13] Grekowa, J.: Der Lehrstuhl, Berlin: Verlag Volk und Welt.

Werner Albring

Erinnerungen an Walther Pauer

Vor 25 Jahren verstarb Walther Pauer nach einem 84 Jahre währenden Leben. Über viele Jahrzehnte war die Technische Hochschule Dresden seine Wirkungsstätte, sein Name ist mit dem Aufbau des dortigen Instituts für Energiewirtschaft ebenso unlösbar verbunden, wie mit der Entwicklung der modernen Energiewirtschaft.

Walther Pauers Jugendjahre fielen in eine Zeit, die von Fortschrittsgläubigkeit, von Vertrauen in die schnelle Entwicklung der Technik, aber auch von gesellschaftlichen Umbrüchen geprägt war: Als er ein Bub von sieben Jahren ist, berichten die Zeitungen über die Gleitflüge Otto Lilienthals. Im Jahr darauf wird in Paris die Weltausstellung eröffnet und der neuerbaute Eiffelturm der Öffentlichkeit vorgestellt. 1894 stirbt Hermann Helmholtz, vier Jahre später Otto von Bismarck.

In Berlins Theatern werden Gerhart Hauptmanns Dramen uraufgeführt: *Vor Sonnenaufgang* (1889), *Die Weber* (1892), *Die versunkene Glocke*. Dichter verstehen es, Stimmungen aufzugreifen, die Volksmeinung in Worte zu fassen. In Gerhart Hauptmanns 1912 publiziertem Roman *Atlantis* unterhalten sich zwei Ärzte enthusiastisch über Ozeandampfer: „Welcher Mut, welche Kühnheit, welcher Grad von Unerschrockenheit liegt darin und welche Welt von Genie ist in den mächtigen Organismus eingebaut! Alles dies ist in kaum hundert Jahren erreicht, es bedeutet erst den Anfang einer Entwicklung. Die Wissenschaft, mehr noch der technische Fortschritt ist die ewige Revolution und die echte und einzige Reformation menschlicher Zustände. Was hier seinen Anfang genommen hat, diese Entwicklung, die ein dauernder Fortschritt ist, wird nichts mehr aufhalten. Es ist der durch Jahrtausende passiv gewesene, plötzlich aktiv gewordene Menscheng Geist. Hoffen wir, daß die letzte Stunde der großen Spiegelfechter, Gaukler und Freibeuter, die vom Seelenfang leben, vor dem schnellen sicheren Schiff der Zivilisation, das den Intellekt zum Kapitän und die Humanität zum Verwalter hat, die Segel streichen.“

Das waren große, aber, wie wir heute wissen, trügerische Hoffnungen auf die menscheitsreformierende Rolle einer sich entwickelnden Technik.

Walther Pauer, Sohn eines bayerischen Gerbereibesitzers, begann als Zwanzigjähriger nach dem Abitur am Regensburger humanistischen Gymnasium das Studium an Münchens Technischer Hochschule und schloß es nach vier Jahren als Diplom-Ingenieur ab. Zu seinen akademischen Lehrern gehörte der berühmte Mechanik-Professor August Föppl, dessen Lehrbücher heute noch die Fachleute mit Genuß lesen. Nach zweijähriger Tätigkeit als Berechnungs-Ingenieur bei MAN in Nürnberg, der Firma, in der der 1913 verstorbene Rudolf Diesel, seinen Motor entwickelt hatte, wechselte Pauer zur Technischen Hochschule von Dresden, er wurde Assistent von Professor Nägel am Lehrstuhl für Kolbenmaschinen.

Ein Jahr später bricht der Erste Weltkrieg aus, Walther Pauer ist 27 Jahre alt. Er gerät als Frontoffizier in französische Kriegsgefangenschaft. Er nutzt die Zeit im Lager, um weiter an seiner Dissertation über Gegendruck- und Entnahme-Dampfmaschinen zu arbeiten. Vor der Entlassung nach Kriegsende überlegt er, daß keine Militärverwaltung seine mit vielen Formeln und Zahlen vollgeschriebenen Manuskriptblätter passieren lassen wird, jeder Militärkontrolleur wittert dahinter Spionagematerial. Er löst das Problem unkonventionell. Seinen Kollegen erzählt er davon bei einer Tischrede zur Feier seines 70. Geburtstages. Die staunenden Zuhörer sehen, wie er aus der Aktentasche eine Rolle grauen Toilettenpapiers zieht, sie etwas abrollt. Darauf steht, mit weichem Bleistift geschrieben, der Text seiner Doktorarbeit. Toilettenpapier durften die aus Kriegsgefangenschaft entlassenen deutschen Offiziere im Reisegepäck mitführen.

Im Jahr 1920 promoviert Pauer im Alter von 33 Jahren in Dresden. Schon ein Jahr später wird seine unter Einfluß Molliers entstandene energiewirtschaftliche Ausarbeitung als Habilitationsschrift anerkannt. Energiewirtschaft, also der sparsame Umgang mit kostbarer Wärmeenergie, bleibt zeitlebens sein Hauptarbeitsgebiet. Schon der 37jährige gilt als Autorität, der den Fachartikel in Teubners Handbuch der Staats- und Wirtschaftskunde verfaßt, 1930 liefert Pauer den Gesamtbericht der Berliner Weltwirtschaftskonferenz. Ein Jahr später erscheint sein energiewirtschaftlicher Beitrag im Ingenieur-Taschenbuch Hütte. Er fungiert als Herausgeber der im Dresdener Steinkopff-Verlag erschienenen Buchreihe über Wärmelehre und Wärmewirtschaft in Einzeldarstellungen. Und im Jahresrhythmus publiziert er seine neu erbrachten Erkenntnisse in Zeitschriften. Eine Lücke klafft zwischen 1941 und 1954. Während dieser Zeit lernte ich Pauer kennen, arbeitete sechs Jahre lang in seiner Nähe im gleichen Betrieb. Über das technische Problem schrieb er später, 1959 war das, einen Artikel über den *Start der ersten interplanetarischen Rakete* für die Dresdener Hochschulzeitung. Unsere Bekanntschaft begann ein Jahr nach Ende des Zweiten Weltkrieges im Sommer 1946 in Bleicherode, einem thüringischen Städtchen, in der Villa des Herrn Gröttrup, des früheren Assistenten des

Raketepioniers Wernher von Braun. Gröttrup sammelte Techniker, die ballistische Raketen weiterentwickeln sollten. Pauers Beschäftigung mit Raketen hatte schon vor dem Kriege begonnen. Damals warb eine von General Dornberger geleitete Gruppe der Heeresversuchsanstalt Peenemünde Partner zur Mitarbeit. Sie beauftragte Pauer, die Treibstoffeinspritzung des Raketenmotors zu optimieren. Ebenso fand man zur Mitarbeit die Professoren Wollmann und Frieser. Frieser sollte mit fotografischen Methoden die Flammentemperatur des Raketenstrahls ermitteln, Wollmann die Steuerungsautomatik einrichten. Die Mitarbeiter des Büros Gröttrup hörten damals im Sommer 1946 Pauers Vortrag über Strömungsprobleme des Brennstoffeinspritzens.

Ich selbst hatte bis Kriegsende als stellvertretender Leiter des Instituts für Aerodynamik und Flugtechnik an der Technischen Hochschule von Hannover gearbeitet. Nach Auflösung des Instituts zu Kriegsende war ich froh, als Aerodynamiker im Kollektiv Gröttrup arbeiten zu dürfen. Damals im Sommer 1946 war ich 32, Pauer 59 Jahre alt. Pauer erzählte von seinen sechs noch jungen Kindern und seiner Frau in Dresden. Zur Versorgung der Familie waren die Lebensmittelzulagen, die das Bleicheröder Institut den Mitarbeitern bot, wichtig geworden.

Im Oktober 1946, also vor 50 Jahren, wurden 150 der in Bleicherode Tätigen, und externe Mitarbeiter wie Pauer, mit ihren Familien in die Sowjetunion transportiert. Das war eine kleine Auswahl unter den 7.000 Mitarbeitern, die in den Zentralwerken Gröttrups wirkten. Pauer wurde zunächst mit seiner Familie gemeinsam mit einer kleinen Gruppe deutscher Spezialisten in einem Moskauer Wohnheim des Ministeriums für Bewaffnung untergebracht. Wir anderen wurden auf der einsamen, schön gelegenen Insel Gorodomlia im Seligersee, nahe den Wolgaquellen, angesiedelt.

Der zweite Nachkriegswinter 1946/1947 war streng und kalt. Er war auch für die Familie Pauer schwer durchzustehen. In langen Kriegsjahren war die Winterkleidung der Kinder verbraucht, die Kinder konnten in den Frostmonaten kaum ins Freie gehen. Der Vater organisierte eine Art von Mini-Familien-Schule. Während er im Institut arbeitete, mußten die drei älteren Kinder als Lehrer der jüngeren fungieren.

Im Frühjahr, am 1. April 1947, dem 60. Geburtstag von Walther Pauer, gelangte er mit seiner Familie zum neuen Wohnort auf der Insel Gorodomlia. Nicht, wie man im Vorfrühling vermuten könnte, mit einem Dampfer von der Kreisstadt Ostaschkow aus. Gorodomlia liegt weit nördlich, der Winter währt lang. So wurde die Familie mit einem Lastauto über den noch zugefrorenen See gefahren. Die Reise schien abenteuerlich, schon lag viel Schmelzwasser auf dem Eis, das das Auto zu gewaltigen Fontänen hochsprühte. Die deutschen Bewohner der Insel hatten sich zum Empfang versammelt. Alle bisher in Moskau tätigen deutschen Spezialisten wurden nach Gorodomlia gebracht, unter ihnen auch die Doktoren Hoch und

Magnus, Fachleute für automatische Steuerungen; früher hatten sie an der Universität Göttingen gearbeitet. Ich selbst fand wenig Zeit, Ankunft und Begrüßung zu genießen, gehörte ich doch zusammen mit Professor Klose und dem Verwaltungsassistenten Kirchner zur Wohnungskommission, die die Neuangekommenen in deren Heimstätten einweisen mußte. Zwar hatten während des Winters fleißige russische Soldaten ein zusätzliches mehrstöckiges Holzhaus errichtet, doch es reichte nicht, um alle Neuangekommenen unterzubringen. So mußten die Alteinwohner zusammenrücken, Zimmer frei machen, damit hernach entsprechend der Familiengröße aller Wohnraum gerecht aufgeteilt war.

Im Institut wurde Pauer Leiter des Sektors Thermodynamik als Nachfolger von Dr. Zeise, einem wissenschaftlich hochrangigen Verbrennungsstatistiker. Forschungs- und Entwicklungsprobleme des Raketenmotors waren Hauptaufgabe des Sektors Thermodynamik. Dazu gehörte das Kühlen der Doppelwandungen mit zufließendem Treibstoff und das Zusatzkühlen mit Einspritzen von Treibstoff, wobei die Verdampfungswärme an Stellen hoher Wärmebelastung besonders kühlte. Dazu zählte auch das Aggregat der Einspritzpumpe, angetrieben von einer kleinen Gasturbine. Im wissenschaftlichen Kolloquium berichtete Pauer, daß man anfänglich beim Einspritzen eine kritische Geschwindigkeit, bei der sich ein glasklarer Strahl milchig trübt, für den Umschlag von laminar zu turbulent diagnostizierte, nach neuen Experimenten aber als durch örtliches Verdampfen, also durch Kavitation verursacht, erkannt habe.

Bald lernten die Pauers alle Lebensumstände auf dem kleinen bewaldeten Eiland kennen. Sie wohnten in einem Holzhaus inmitten des Gorodomlia-Dörfchens, nicht weit entfernt vom flachdachigen, zweistöckigen, gemauerten Institutsgebäude. Das Dorf war von dichten Wäldern mit hohen Fichten umgeben. Durch die Wälder wandernd konnte man den malerisch schönen Binnensee erreichen und das zweite, von wenigen Russen bewohnte Dorf Perwoimaiska. Schließlich gelangte man am Ende der kleinen Welt an den Stacheldraht, der Strand und Außensee vom erlaubten Inselgebiet trennte, bewacht von Posten mit umgehängtem Gewehr.

Erst Jahre nach der Rückkehr sahen die einstmals Dienstverpflichteten Karten von der Insel. Als Größenabmessungen las man 1,9 mal 1,2 Kilometer. Weil das Gebiet dicht bewaldet war, hatten die Bewohner es nicht als so klein empfunden. Dennoch hätte man die Insel flächenmäßig bequem in Dresdens Großem Garten, der innerstädtischen Parkanlage, unterbringen können.

Über viele Jahre war das Inselchen für 500 Deutsche der Lebensraum. Man kannte keinen Endtermin der Dienstverpflichtung. Jeder wird sich vorstellen können, daß solche Isolation viele ernste, ungewöhnliche Probleme aufwürfte. Für einen Erforscher menschlicher Verhaltensweisen wäre die Insel mit ihren Bewohnern ein einzigartiges Beobachtungsfeld gewesen. Doch es gab unter den Deutschen keinen Fachpsychologen. Rückschauend läßt sich berichten, daß manche Bewoh-

ner schrecklich unter den Beschränkungen litten, andere aber sich abfanden und das Beste daraus machten. Schon Aristoteles hatte Menschengruppen mit verschiedenen Charakteren und verschiedenen Temperamenten erkannt. So kann der gleiche Ablauf von Sanguinikern und Melancholikern ganz verschieden bewertet werden.

Das Lebensalter der meisten Spezialisten lag zwischen 30 und 40 Jahren. Pauer galt mit 60 Jahren als respektabler Alterspräsident, der auch bei den wenigen Hochzeiten junger Deutscher als Standesbeamter fungierte. Pauer wußte aus der Erfahrung der Kriegsgefangenschaft, wie leicht sich gefährliche Psychosen entwickeln und ausbreiten können, und daß man dem aktiv durch Freizeitbeschäftigungen wie Kunst, Sport und geistige Arbeit entgegenwirken muß, damit keine „Stacheldrahtkrankheit“ – so nannte er das – entsteht. Pauer spielte Klavier. Das Instrument hatte man aus Deutschland mitgebracht, die Töchter spielten Cello und Violine. Die Pauerkinder traten als Schauspieler im Inseltheater auf, wirkten mit in *Der zerbrochne Krug* von Kleist, in *Der letzte König von Orplid* von Möricke und im *Tartuffe* von Molière. Das erste Stück wurde zur Winterzeit auf der Bühne des Klubs gespielt, das zweite auf amphitheatralischer Waldbühne im Sommer, das letzte als Studioaufführung in einer Wohnung.

Ich selbst erlebte Pauer in den Leitungssitzungen, die der deutsche Hauptkonstrukteur Gröttrup abhielt oder denen der russische Inseldirektor bzw. sein russischer Hauptingenieur präsierten. Nicht selten rief der Inseldirektor die deutschen Sektorleiter zu einer Strafpredigt zusammen. Da hatten Deutsche an unerlaubter Stelle einen Baum zwecks Brennholzbeschaffung gefällt, oder andere hatten, um dem Stromabschalten in den Wohnungen zu entgehen, Schalter gebaut zum Einschalten der jeweils mit Strom belieferten Phase.

Pauer hatte im Leitungskollektiv gegenüber den meisten Deutschen einen Altersvorsprung von fast zwanzig Jahren. Und weil er stets seine Gedanken wohlüberlegt vorbrachte, achteten auch die Russen besonders aufmerksam auf seine Worte. Nachdem das deutsche Kollektiv alles technische Material zur Rekonstruktion der Peenemünder Rakete A 4 erstellt hatte, wurde das Gerät unter Bewahrung der Außenform umkonstruiert und durch Gewichtsverringerung verbessert, wodurch die Flugweite von anfangs 200 Kilometern auf das Fünffache gesteigert werden konnte. Doch bald stellten die Russen höhere Ansprüche. Die Transportlast war von anfangs einer Tonne auf drei und die Flugweite auf dreitausend Kilometer zu steigern. Dazu mußten Mehrstufenraketen entwickelt, dazu mußte der Schub gegenüber dem A 4-Triebwerk sehr gesteigert werden und das in einem Maß, wozu Druck- und Durchsatzsteigerungen des vorhandenen Raketenmotors nicht ausreichen konnten. Die deutschen Ingenieure mußten einsehen, daß ihnen auf der Insel weder die experimentelle Basis noch die personelle Besetzung zum Entwickeln derartig vergrößerter Raketenmotoren zur Verfügung stehen würden. Sie fanden

aber eine exzellente Ausweidlösung, nämlich die verfügbaren Triebwerke in Parallelschaltung nebeneinanderliegend anzuordnen. Dieses Prinzip wird noch heute, fünfzig Jahre später, bei den russischen kosmischen Raketen angewandt. Alles andere, besonders die Umgestaltung der Außenform, konnten die deutschen Ingenieure schaffen.

Doch einer der Triebwerksingenieure, Dr. Umpfenbach, war mit einer radikalen Neuerung des Raketenmotors hervorgetreten. Die kleine Gasturbine zum Antrieb der Treibstoffpumpe war durch Verbrennen von Wasserstoffsuperoxid mit Kaliumpermanganat versorgt worden. Das Gemisch war während des Krieges als „Walter Treibstoff“ bekannt. Umpfenbach schlug vor, das Gas zum Antrieb der Turbine dem Brennraum des Triebwerks zu entnehmen. Mit seinem kühnen Vorschlag erntete er zunächst bei Deutschen und Russen viel Widerspruch. Jedoch verlangte bald die russische Leitung, gemäß Umpfenbachs Idee zu entwickeln.

Pauer schien solches Unterfangen bei den Arbeitsmöglichkeiten auf Gorodomlia so abenteuerlich, daß er im Einverständnis mit der deutschen und russischen Leitung das Amt des Sektorleiters abgab. Nachfolger wurde Umpfenbach. Er erhielt alle Unterstützung. Es wurde ein Prüfstand für modellmäßig verkleinerte Raketenmotoren gebaut und betrieben.

Schon in meinen ersten Gesprächen mit Pauer spürte ich seine Art, stets zum Grund der Probleme vorzustoßen. Damals, es war in den ersten fünf Jahren nach dem Krieg, sagte er mir, er hielt den Ausbau des Individualverkehrs mit Automobilen für eine eklatante Fehlentwicklung. Nicht nur würden übergroße Energien zum Transport vergeudet, sondern auch der damit verbundene Ausbau des Straßennetzes sei unvertretbar.

Ich lernte auch eine andere Eigenschaft Pauers kennen. Er sagte über Abwesende niemals etwas Negatives, sondern er wußte zu jedem Menschen Positives anzuführen. Man mußte ihn schon genauer kennen, um zu bemerken, daß bei denen, die er im Grunde nicht mochte, das Spektrum guter Eigenschaften, von denen er sprach, etwas schmaler bemessen war.

Solches übte eine stark prägende Wirkung auf die deutsche Gemeinschaft aus. Zumal Pauer aus anderem Grund hochgeschätzt wurde: Er zeigte Zivilcourage. Hatten alle anderen schon bei einer Philippika der Russen den Kopf gesenkt und allenfalls die Faust in der Tasche geballt, dann stand er mutig auf und brachte Argumente vor, die auch die Gegenseite nachdenken ließen. Hielt er aber eine unpopuläre Maßnahme der Russen für unumgänglich, dann sagte er das seinen Landsleuten, die sich fügten. Nicht nur ich, sondern viele Gorodomlianer haben von ihm durch Vorbildwirkung gelernt. Dann, im Sommer 1952 nach fast sechs Inseljahren, leuchtete die Sonne besonders strahlend für alle diejenigen, die in die Heimat zurückkehren durften. Die Familie Pauer war dabei.

An der Technischen Hochschule von Dresden war Pauers Lehrstuhl für Wärmewirtschaft mit einem Nachfolger besetzt worden. Die Verwaltung fand eine gute Lösung. Sie gründete für Pauer einen Parallelllehrstuhl und ein Parallelinstitut der Energiewirtschaft. Bei der damaligen großen Studentenzahl und dem gleichzeitigen Professorenmangel eine weise Entscheidung. Pauer fand sogleich bestes persönliches und fachliches Einvernehmen zum Kollegen für Wärmewirtschaft, Professor Boie.

Pauer stellte auch für meine eigene Weiterarbeit die Weichen. Ich hatte im Oststaat noch keine Stelle gefunden, verbrachte abwartend und suchend den Sommerurlaub mit der Familie an der Ostsee. Dorthin schrieb mir Pauer und schlug vor, nach Dresden zu kommen, wo es im Gegensatz zu den anderen deutschen Technischen Hochschulen noch kein Institut für Strömungsmechanik gab. Hier hatte bisher der Thermodynamiker Mollier die Strömungslehre als ein Nebenfach vertreten. So siedelte ich mit Familie nach Dresden um, zum September 1952 hatte mich die Technische Hochschule in ihren Lehrkörper berufen. Die Stadt zeigte noch alle grausamen Kriegszerstörungen, doch bei den Studenten und Hochschullehrern herrschte eine optimistische Stimmung. Wenn es in Dresden und im Land je besser werden sollte, dann müßten dazu die Impulse aus der Technik kommen. Nach einem Zwischenspiel hatte die Familie Pauer wieder ihr angestammtes Wohnhaus beziehen können, doch dann brach Unheil über sie herein.

Eines Nachmittags, ich kehrte von einem Ausflug zurück, hatte meine Frau den ältesten Pauer-Sohn zu Gast. Ich sah den Zwanzigjährigen mit tränenüberströmtem Gesicht. Er berichtete, daß der Vater frühmorgens von der Geheimpolizei verhaftet worden sei. Die Nachricht bedeutete auch für mich einen Schock. Wie konnte man diesen integren Mann überhaupt verdächtigen, wie ihn verhaften! Ich fuhr sogleich zum Rektor, in dessen Wohnung, es war ein Sonntag. Der Rektor beruhigte mich, sagte, er würde am nächsten Morgen die Fakultät zusammenrufen, dann könne man beraten. Die Kollegen waren ebenso deprimiert wie ich, jedoch hatten sie in den zurückliegenden Jahren manche Verhaftung durch Besatzer erlebt, für sie war das Ereignis nicht ungewöhnlich. Von einem gemeinschaftlichen Protest der Fakultät, den Heinrich Barkhausen und ich vorschlugen, rieten sie ab. Bei näherem Nachdenken mußte ich einsehen, daß die Russen grundsätzlich Sammelprotest abschlägig beschieden. So würden auch die deutschen Dienststellen reagieren.

Ich schrieb empörte Briefe an die deutschen Ministerien. Ich fuhr sogleich nach Berlin, um die Minister aufzusuchen. Aber ich konnte nie weiter als bis zu deren persönlichen Referenten vordringen, die kühl und sachlich meine aufgeregten Proteste anhörten und versprachen, sich um den Fall zu kümmern. Das Unheil in Dresden schien sich noch zu vergrößern, als auch Pauers damaliger Assistent, Elsner, der auch auf Gorodomlia gearbeitet hatte, verhaftet wurde. Doch zu meiner großen

Freude war Elsner bald wieder frei. Er erzählte mir, daß nicht Deutsche, sondern Russen ihn und wahrscheinlich auch Pauer verhaftet hätten.

Bei der Technischen Hochschule gab man mir zu verstehen, daß man erwarte, ich werde mich von dem offensichtlich als Verbrecher beschuldigten Pauer und seiner Familie distanzieren. Zwar hatte ich schon bald gespürt, daß alle meine Proteste und Demarchen wirkungslos blieben, aber Abstand hielten meine Frau und ich in keiner Weise. Jeden Sonntagvormittag besuchten wir Frau Pauer, mit dem Auto vorfahrend, in deren Wohnung und munterten sie auf. Ich wurde zu immer neuen Aktivitäten angeregt durch die Überlegung: Was würde Pauer im umgekehrten Fall für dich tun, wenn du verhaftet wärst und er sich in Freiheit befände?

Der ganze Sommer verging, und erst im Herbst besuchte mich ein Russe mit der erfreulichen Botschaft: Professor Pauer ist frei, alle Anklagen sind niedergeschlagen, seine Unschuld ist erwiesen.

Er war offensichtlich einer Intrige zum Opfer gefallen. Den Russen war Spionagematerial über ein Flugzeug zugespielt worden, das angeblich Pauer verfaßt haben sollte. Er erzählte mir: „Meine Verteidigung war sehr einfach, ich konnte immer wiederholen, ich habe niemals an Flugzeugen gearbeitet, kann also darüber auch keine Berichte schreiben.“

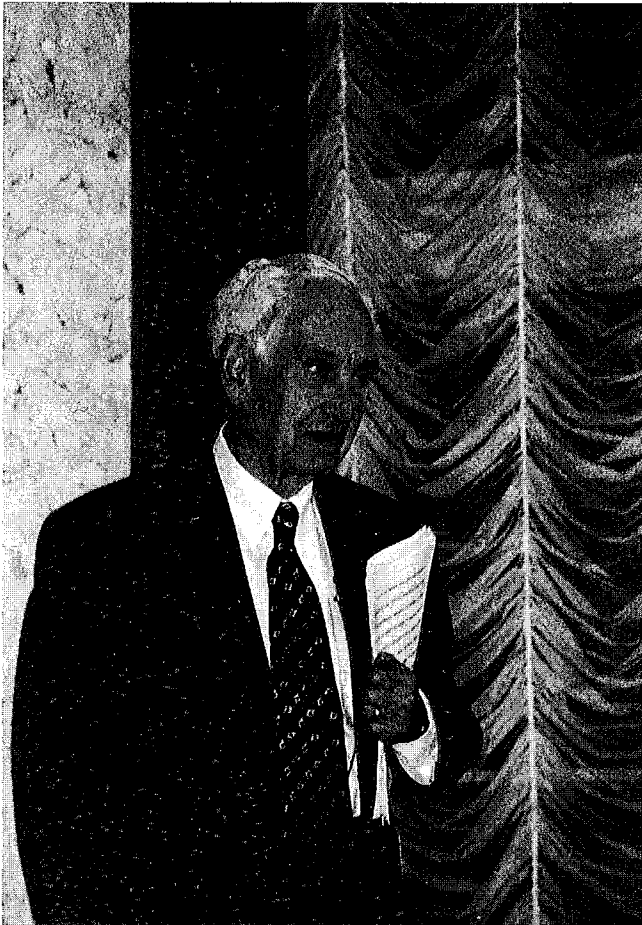
War es eine Verwechslung gewesen? Oder eine Provokation, mit der in der DDR angesiedelte Rußlandheimkehrer verunsichert und zur Flucht in den Weststaat animiert werden sollten? Noch heute, mehr als vierzig Jahre später, gibt es keine Antwort.

Pauer erholte sich erstaunlich schnell. Wieder arbeitete er intensiv an der Technischen Hochschule. Wieder zeugt seine Publikationsliste von ungebrochener Aktivität. Der deutsche Oststaat ehrte ihn 1955 durch Berufung zum ordentlichen Mitglied der Deutschen Akademie der Wissenschaften, verlieh ihm 1958 den Vaterländischen Verdienstorden und sprach 1962 die seltene Ehrung „Hervorragender Wissenschaftler des Volkes“ aus. Zum Bedauern seiner Fakultätskollegen stellte Pauer zur Jahreswende 1957/58 die Lehrtätigkeit ein, er war 70 Jahre alt geworden. Ich konnte 1961/1962 als Dekan der Maschinenbauer im Senat eine Lanze für das Pauer-Institut brechen. Die damaligen Ausbilder von Industrie-Managern, sie nannten sich Ökonomen, erhoben Einspruch gegen den Namen „Institut für Energiewirtschaft“. Denn das sei eindeutig eine Disziplin der Ökonomen. Der Angriff wurde abgeschlagen. In früheren Jahren hatte Pauer immer wieder die wissenschaftliche Aussprache mit den Ökonomen gesucht. Auf seinen Vorschlag hin waren von der Sektion Maschinenbau der Berliner Akademie gemeinsame Vorträge und Diskussionen organisiert worden, die die Akademie später publizierte. Pauer hatte mit Vorgesprächen sorgfältig die verschieden gedeuteten Begriffsinhalte beider Disziplinen, der Maschinenbauer und der Ökonomen, klar gestellt.

So hätte es weitergehen können. Doch das Schicksal gönnte Pauer keinen Lebensabend in Gesundheit. Im Jahr 1960 erlitt er einen Schlaganfall, dem er anfangs tapfer widerstand. Am Arm seiner Frau besuchte er trotz halbseitiger Lähmung wissenschaftliche Veranstaltungen, sogar Sitzungen der Akademie in Berlin. Das grausame Geschick blieb stärker, verurteilte ihn bald zu Hilflosigkeit und zu einem Leben nur noch im Bett, fast zehn Jahre lang, bis am 20. November 1971 die Lebensflamme erlosch.

Doch vieles aus Pauers Schaffen ist lebendig geblieben. Man muß ihn den Pionier und den Vater der modernen Energiewirtschaft nennen. Er hat Anschauungen und Begriffe geprägt, die unveräußerlich in das Denken und Wirken moderner Ingenieure gedrungen sind. Doch ebenso wichtig ist seine Vorbildwirkung positiver menschlicher Eigenschaften gewesen. Sie muß bleiben und sich in neuen Generationen mehren, damit menschliche Werte in der modernen Gesellschaft nicht von materiellen Kriterien überwuchert werden.

Ernst-Mayr-Lecture



Ernst Mayr
(bei der Eröffnungsvorlesung zur Ernst-Mayr-Lecture
am 14. Oktober 1997 in Berlin)

Ernst-Mayr-Lecture

Die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften und das Wissenschaftskolleg zu Berlin haben gemeinsam eine „Named-Lecture“ auf dem Gebiet der Biowissenschaften gestiftet. Die Vorlesung ist nach dem führenden Ornithologen und Evolutionsbiologen Ernst Mayr benannt und soll in der Regel jährlich einmal – zu Beginn des Wintersemesters – stattfinden.

Ernst Mayr, Alexander Agassiz Professor für Zoologie (em.) und langjähriger Direktor des Museums of Comparative Zoology an der Harvard University in Cambridge, Massachusetts, 1994 zum Ehrenmitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften gewählt, hatte die Einladung angenommen, die nach ihm benannte Vorlesungsreihe selbst zu eröffnen.

Dieter Simon, Präsident der BBAW, begrüßte im Namen der Veranstalter am 14. Oktober 1997 im überfüllten Marmor-Saal des Palais am Festungsgraben in Berlin-Mitte die Gäste zur Eröffnungsvorlesung.

Rüdiger Wehner

Einführung Ernst Mayr – ein Fels in der evolutionsbiologischen Brandung

(*Ernst-Mayr-Lecture am 14. Oktober 1997*)

Wenn *ein* prominenter Amerikaner von sich behaupten kann, er sei Berliner, dann ist es Ernst Mayr. Vor mehr als 70 Jahren hat er an der hiesigen Humboldt- (damals Friedrich-Wilhelms-) Universität promoviert. Nähme man das heutige mittlere Promotionsalter eines Berliner Biologiestudenten als Maßstab, wäre Ernst Mayr jetzt 103 Jahre alt. Doch davon ist er weit entfernt.

Am Beginn seiner Biologenlaufbahn standen zwei scheinbar harmlose Begebenheiten, die seinen Aufstieg zum wohl markantesten und einflußreichsten Evolutionsbiologen unseres Jahrhunderts entscheidend befördern sollten. Da war zunächst die Begegnung mit *Netta rufina*. Ernst Mayr hatte sie, diese rotköpfige, in unseren Landen damals noch rare Spezies (zu deutsch: Kolbenente), an den Moritzburger Teichen beobachtet und sich die korrekte Bestimmung der Art später von Erwin Stresemann bestätigen lassen. Professor Stresemann, Doyen der deutschen Ornithologie und Kurator am Berliner Museum für Naturkunde, lernte auf diese Weise den jungen Studenten der Medizin persönlich kennen und ließ ihn später – nach dessen Wechsel zum Biologiestudium – über ein ornithologisches Thema promovieren.

In der zweiten folgenschweren Begegnung treffen wir Ernst Mayr zusammen mit Lord Walter Rothschild, jenem Zoologen und Exzentriker, der in einer von Zebras vierspännig gezogenen Kutsche durch die Straßen Londons fuhr und – wohl bedeutsamer – dem damals 23jährigen Ernst Mayr eine Expedition nach Neuguinea ermöglichte. Dort sollte der junge Postdoktorand für das Rothschild-Museum in Tring (Hertfordshire) Vögel sammeln und speziell nach einer Reihe von Paradiesvögeln Ausschau halten. Zwar kamen ihm die Paradiesvögel nie zu Gesicht, aber die Ausbeute an 2.700 Vogelbälgen übertraf alle Erwartungen: „The expedition was a great success and cost Walter only £ 1.917“, schrieb später die Nichte des Sponsors, Miriam Rothschild.

Doch dann folgte 1930 Lord Walters finanzieller Ruin und mit ihm der Verkauf der ornithologischen Sammlung von Tring – der größten der Welt – ans *American Museum of Natural History* in New York. Sofort wurde Ernst Mayr vom American Museum angestellt: zunächst nur für ein Jahr, um die Vogelausbeute der berühmten *Whitney South Seas Expedition* zu bearbeiten, an der er im Anschluß an seine Neuguinea-Expedition teilgenommen hatte. Doch entfaltete er dabei eine solche Aktivität – allein mehr als ein halbes Duzend Publikationen im ersten Jahr –, daß das American Museum seine Anstellung umgehend verlängerte. Schließlich bekleidete er das Amt des Ornithologie-Kurators in New York für mehr als 20 Jahre, bis er 1953 die Alexander-Agassiz-Professur an der *Harvard University* übernahm, wo er gleichzeitig als langjähriger Direktor des berühmten *MCZ* – des *Museum of Comparative Zoology* – tätig war. Seine Emeritierung 1975 nahm auf seine Forschungsintensität, seine Publikationstätigkeit und seine Bedeutung für die Evolutionsbiologie unserer Tage keinerlei Einfluß. Alles lief und läuft unvermindert, d. h. auf Hochtouren, weiter.

Was Charles Darwin Galapagos bedeutete, war für Ernst Mayr Neuguinea. Diese reich gekammerte und durch Bergrücken zergliederte tropische Mega-Insel bot der Diversifizierung von Lebensformen ideale biogeographische Voraussetzungen, der Erforschung dieses Biodiversitäts-Eldorados jedoch auch formidable Schwierigkeiten. Jared Diamond, der Neuguinea aus gleichen ornithologisch-evolutionsbiologischen Gründen ein halbes Jahrhundert später intensiv bereiste, schrieb mir kürzlich: „Ernst went to New Guinea at the age of about 23 and spent a year exploring some of New Guinea’s most remote mountain ranges. Having been in some of those same mountains within the last ten years, under much more secure conditions, I can say that it was an astonishing feat of physical exploration that Ernst accomplished.“

Hier, bei seinen Beobachtungs- und Sammeltouren im australisch-südwestpazifischen Raum, muß in ihm die Überzeugung gereift sein, daß – erstens – geographische Isolation einen wesentlichen Evolutionsfaktor bedeutet und daß – darauf aufbauend, zweitens – biologische Arten als genetische Fortpflanzungsgemeinschaften zu definieren sind, als Gruppen natürlicher Populationen, die miteinander im Genaustausch stehen, jedoch gegenüber anderen solchen Gruppen reproduktiv isoliert sind. Mit diesem biologischen Artbegriff (*trademark* Ernst Mayr), diesem evolutionär dynamischen, nicht mehr typologisch statischen Biospezies-Konzept, hat er zusammen mit Theodosius Dobzhansky, Julian Huxley und einigen wenigen weiteren Mitstreitern um die Mitte dieses Jahrhunderts die Neue Synthese der Evolutionsbiologie begründet. In seinem wohl einflußreichsten Werk, der „*Systematics and the Origin of Species*“ (1942), schildert er diese Entwicklungen mit der ihm eigenen prägnanten Überzeugungskraft.

Für den heutigen Biologen – mit der inzwischen fest etablierten Neuen Synthese im Kopf – ist es kaum mehr vorstellbar, daß schon unmittelbar nach Darwins Tod der Kampf zwischen Genetikern und Naturalisten, Zellbiologen und Systematikern, Mendelianern und Biometrikern entbrannte, mutationistische und selektionistische Theorien unversöhnlich aufeinanderprallten und Morgans Mutationsdruck oder Goldschmidts *hopeful monsters* Darwins *natural selection* völlig devaluierten. Darwins Artbildungskonzept – das zentrale Element seiner evolutionstheoretischen Vorstellungen – mußte einem außenstehenden Beobachter zu Beginn dieses Jahrhunderts als weithin widerlegt erscheinen. In dieser Phase intellektueller Dissonanz, des gegenseitigen Unverständnisses zweier widerstreitender hyperaktiver Forschungslager, war es kein Kuhnscher Paradigmenwechsel, dem die neue Evolutionsbiologie entsprang; es war Ernst Mayrs beharrliche Synthese, die Darwins Denken letztlich wieder zu seinem allgemein anerkannten Recht verhalf.

Fachspezifisch wäre manches anzufügen: zum Beispiel Ernst Mayrs Verdienst, mit der Neuen Synthese gezeigt zu haben, daß zwischen partikulärer Vererbung und kontinuierlicher Variation der Individuen innerhalb von Populationen kein Widerspruch besteht und damit die natürliche Selektion an der von Darwin gewünschten Stelle angreifen kann. Doch hier im Marmorsaal, im Angesicht von Akademie und Wissenschaftskolleg, stehe vor allem eines im Vordergrund: Ernst Mayrs weit ausgreifende synthetische Leistung – eine Fähigkeit, die bei der heute rasanten Divergenz biologischer Disziplinen gerade zu Ende dieses Jahrhunderts mehr denn je gefragt ist. Nach wem denn sonst hätten wir die soeben begründete bio-wissenschaftliche Vorlesungsreihe treffender und wirkungsvoller benennen können als nach jenem Berliner Ornithologen, der die Evolutionstheorie – die heute zentrale Theorie der Biologie – noch in ihren weiten Verästelungen zu erfassen und zu bewerten imstande ist?

Doch blicken wir noch einmal zurück. Auch nach der Neuen Synthese kam das Meer nicht zur Ruhe. Molekularbiologie und Populationsgenetik, Kladistik, ökonomische Betrachtungsweisen und mathematische Komplexitätsmodelle taten und tun das ihre, die evolutionsbiologische Dünung ständig neu zu beleben. In allen diesen Auseinandersetzungen der jüngsten Zeit steht Ernst Mayr wie ein Fels in der Brandung, den zu umschiffen sich für Opponenten bis heute immer wieder als risikoreiches Unternehmen erwiesen hat. „He fights the battles of evolutionary biology in their pure state“, schrieb kürzlich David Baltimore in *Nature*.

Eine zweite, anders geartete, vielleicht aber doch verwandte Synthese ist Ernst Mayr mit zwei jüngeren Werken gelungen: wissenschaftshistorisch das eine („*The Growth of Biological Thought*“, 1982) und wissenschaftsphilosophisch das andere („*Toward a New Philosophy of Biology*“, 1991); beide gefolgt von dem im März dieses Jahres erschienenen und inzwischen bereits im 4. Nachdruck vergriffenen

Bestseller „*This is Biology*“ (1997). Unmißverständlich schildert Ernst Mayr hier seine eigenen Erfahrungen auf dem Gebiet der Wissens- und Ideengeschichte: „In the 1950s, when I became acquainted with the field of the philosophy of science, I was bitterly disappointed. This was not philosophy of science, this was a philosophy of logic, mathematics, and the physical sciences. It had almost nothing to do with the concerns of biologists. Around this time I sat down and made a list of the major generalizations of evolutionary biology stated in books and published papers ... and found that not a single one of them was adequately covered in the philosophical literature; most of them were not even mentioned.“ Jetzt, in der ersten *Ernst-Mayr-Lecture*, kommen sie zur Sprache. Ernst Mayr wird zeigen, wie sich – genauer gesagt: wie er – das Blatt gewendet hat.

Ernst Mayr

Was ist eigentlich die Philosophie der Biologie?

(Eröffnungsvorlesung zur Ernst-Mayr-Lecture am 14. Oktober 1997)

Während der letzten drei Jahrzehnte ist der Begriff Philosophie der Biologie immer häufiger gebraucht worden. Was versteht man darunter? Und warum ist dieser Terminus erst in unserer Zeit populär geworden? Diese Fragen können wir erst nach einer historischen Analyse beantwortet werden.

Das, was man Philosophie nennt, entstand unter den ionischen Griechen im 6. Jahrhundert v. Chr. Aristoteles (380–320 v. Chr.) war nicht nur ein großer Philosoph, sondern auch ein hervorragender Naturforscher, dessen Verständnis der Mannigfaltigkeit der Lebewesen und der Natur der Lebensprozesse erst im 18. Jahrhundert übertroffen wurde. Zu seiner Zeit gab es keine Trennung zwischen Philosophie und Wissenschaft, und das blieb so während der nächsten 2.000 Jahre. Eigentliche Wissenschaft, wie wir sie heute definieren, entstand aus der sogenannten *Scientific Revolution*, die durch die Namen Kopernicus, Galilei, Kepler, Newton, Descartes und Leibniz gekennzeichnet wird.

Gleichzeitig entwickelte sich eine klar definierte Wissenschaftsphilosophie, die allerdings beinahe ausschließlich auf Mechanik, Astronomie, Mathematik und Logik fundiert war. Die ersten dieser physikalistischen Philosophen, wie Newton, Descartes und Leibniz, waren sowohl Wissenschaftler wie Philosophen, und dasselbe trifft mehr oder minder auf die physikalistischen Philosophen der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts zu, wie Herschel, Whewell, Mill und ihre Schüler. Obwohl viele Physiker, wie Boltzmann, Mach, Bridgman, Bohr, Einstein und Heisenberg, in den nächsten 100 Jahren wichtige Beiträge zur Wissenschaftsphilosophie leisteten, waren sie doch eigentlich Physiker. Das änderte sich im 20. Jahrhundert, als Wissenschaftsphilosophie immer mehr von Berufsphilosophen übernommen wurde, gekennzeichnet durch die sogenannte Wiener Schule und Autoren, wie Wittgenstein, Hempel, Nagel und Popper. Es muß betont werden, daß alle Arbeiten über Wissenschaftsphilosophie, die von diesen Autoren veröffentlicht wurden, ausschließlich auf Physik, Mathematik und Logik beruhen. Diese Philosophie be-

tonte die Wichtigkeit von Universalgesetzen und nahm im allgemeinen Essentialismus, Determinismus und die Wichtigkeit der Voraussage (*prediction*) an. Eine historische Analyse gab es in ihr nicht.

Entfremdung

Die Vorherrschaft dieser rein physikalistischen Wissenschaftsphilosophie führte zu einer Entfremdung zwischen Philosophie und Biologie. Eine Philosophie, die eine reine Philosophie des Physikalismus war, hatte dem Biologen nicht viel zu sagen. Zahlreiche Aussagen der Physikalisten zeigen, daß sie keinerlei Verständnis für Biologie hatten. Ludwig Wittgenstein verriet dies, als er sagte: „Darwin's theory has no more to do with philosophy, than any other hypothesis in natural science.“ Und Karl Popper bezeichnete noch 1974 Darwinismus als ein „metaphysical research program“. Da die Philosophen versagten, mußte die neue Philosophie der Biologie von den Biologen begründet werden. Und in der Tat, das ist was geschah, und viele Biologen trugen dazu bei. Der wichtigste von ihnen war natürlich Darwin. Merkwürdigerweise wurde das fast allgemein ignoriert. Selbst der sonst so scharfsichtige Evolutionist G. G. Simpson sagte: „Darwin war kein Philosoph!“ Heute wissen wir, daß Darwin der führende Philosoph der Biologie war, als solcher aber nicht erkannt wurde, weil seine Philosophie außerhalb des Rahmens der physikalistischen Philosophie lag.

Die sich zur Zeit entwickelnde Philosophie der Biologie ist das Werk von Biologen, von Leuten wie Dobzhansky, Mayr, Rensch, Simpson, Ayala und anderen mehr. Die Historiker müssen herausfinden, wer sonst noch beigetragen hat, sicherlich Sewertzoff und Schmalhausen in Rußland und Autoren, wie François Jacob, Maynard Smith, Walter Bock und Michael Ghiselin. Merkwürdigerweise sind von verschiedenen Philosophen zur selben Zeit einige Philosophien der Biologie veröffentlicht worden, die noch ganz im Geist der alten positivist-physikalistischen Philosophie geschrieben sind (Ruse 1973, Rosenberg 1985).

Es ist erstaunlich, daß in den 300 Jahren von der *Scientific Revolution* bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts mit Ausnahme einiger vitalistischer Schriften nichts veröffentlicht wurde, was man als eine Philosophie der Biologie bezeichnen könnte. Wie kann man dieses Fehlen der Philosophie der Biologie erklären? Die überraschende Antwort ist, daß es für zwei Drittel dieser Periode eigentlich noch keine eigentliche biologische Wissenschaft gab. Zugegeben, Anatomie, Embryologie und Physiologie wurden von der Medizin gepflegt, und ein Interesse an Naturgeschichte war weit verbreitet, aber das einzige philosophische Ergebnis dieser Tätigkeiten war der Vitalismus-Streit. Rückblickend können wir feststellen, daß in dieser Kontroverse die Vitalisten eigentlich vollkommen recht hatten, wenn sie Organismen

nicht einfach mit Maschinen gleichsetzten, wie es die Kartesianer taten. Die Rückständigkeit der Biologie hinderte allerdings die Vitalisten, eine bessere Erklärung zu finden. Welches Datum sollte man als die Geburtsstunde der Biologie wählen? Man kann behaupten, daß die moderne Biologie in den Jahren von 1828 bis 1866 entstand, gekennzeichnet durch die Arbeiten von K. E. von Baer, Schwann und Schleiden, Claude Bernard, du Bois-Reymond, Helmholtz, Darwin, Wallace und Mendel. In dieser Zeitspanne wurde das Fundament für die Philosophie der Biologie gelegt. Allerdings brauchte es noch weitere hundert Jahre bis Vitalismus, kosmische Teleologie und rein metaphysische Erklärungen überwunden waren.

In aller Ehrlichkeit müssen wir feststellen, daß die Philosophen in keiner Weise zu dieser Entwicklung beitrugen. Kant zum Beispiel, als er versuchte, in seiner Kritik der Urteilskraft für die Welt des Lebens ein Parallelwerk zur Kritik der reinen Vernunft zu schaffen, merkte bald, daß das Newtonsche Paradigma nicht paßte. Verzweifelt versuchte er es dann mit der Teleologie, und das war natürlich ein Fehlschlag, wie sich bald zeigte. Kants Mißerfolg ist völlig verständlich: 1790 waren einfach die Informationen noch nicht vorhanden, mit deren Hilfe man eine zuverlässige Philosophie der Biologie hätte entwickeln können.

Ehe ich mein Thema weiter ausführe, will ich versuchen, zunächst einen Einwurf zu entkräften, der immer wieder gemacht wird. Brauchen wir wirklich eine eigene Philosophie für die Biologie, fragen die Zweifler. Die meisten Physiker und vielleicht sogar die Mehrzahl der Wissenschaftsphilosophen sind überzeugt, daß man die Existenz einer solchen Philosophie nicht rechtfertigen kann. Folgen nicht alle Vorgänge auf der Zellebene strikt den chemisch-physikalischen Gesetzen? Und ist es nicht wahr, daß die moderne Physik den strikten Determinismus aufgegeben und die probabilistische Natur der meisten Regelmäßigkeiten angenommen hat? Und wenn der Biologe dann auf die Einzigartigkeiten der lebenden Organismen hinweist, dann mag der Physiker antworten, das seien einfach biologische Tatsachen, aber die hätten nichts mit Philosophie zu tun. Es ist gerade diese Behauptung, gegen die der Biologe heftig protestiert. Er weist auf zahlreiche Aspekte der Welt des Lebens hin, die seiner Meinung nach Komponenten einer abgewogenen Wissenschaftsphilosophie sind, aber in der herkömmlichen, auf Physik basierenden Wissenschaftsphilosophie völlig ausgelassen werden.

Der Grund dafür ist, und das ist das Hauptthema meiner Vorlesung, daß die Biologie eine ganz andere Wissenschaft ist als die Physik. Die Eigenständigkeit (Autonomie) der Biologie zu betonen, war erst möglich, nachdem der Vitalismus gründlich widerlegt worden war. Wie schon gesagt, stimmt der Biologe völlig mit Chemikern und Physikern überein, daß auf der Zellebene alles streng nach den chemisch-physikalischen Gesetzen abläuft. Der Biophilosoph ist völlig überzeugt, daß die Biologie alle Kennzeichen einer objektiven Wissenschaft haben muß, wie sie von den Wissenschaftsphilosophen postuliert worden sind.

Trotzdem sind biologische Systeme derartig von allen nicht belebten Systemen verschieden, daß eine ausschließlich auf die unbelebte Natur begründete Philosophie einfach für die Biologie nicht ausreichend ist. Um die Zweifler von der Richtigkeit dieser Behauptung zu überzeugen, werde ich jetzt zehn Eigentümlichkeiten des Lebenden besprechen, durch die es sich grundlegend von der unbelebten Welt unterscheidet. Es handelt sich dabei teilweise um grundlegende Tatsachen, aber auch um völlig neue Konzepte.

1 Der Dualismus der Lebewesen

Ich spreche hier nicht von dem Dualismus der Kartesianer oder Vitalisten, sondern von einem ganz anderen Dualismus, der auf den Befunden der Genetik und Molekularbiologie beruht. Die unbelebte Materie gehorcht den Gesetzen der Physik und so tun es grundsätzlich auch Lebewesen. Alle physikalisch-chemischen Prozesse in einem Lebewesen verlaufen, wie es die Gesetze der Physik und Chemie vorschreiben. Diese Verursachung wird manchmal als *proximate causation* bezeichnet. Aber jede Aktivität, jedes Verhalten, jeder physiologische Vorgang und alles Wachstum eines Lebewesens, wird gleichzeitig durch das genetische Programm geregelt. Da dieses Programm das Resultat von Selektion ist, die auf Millionen von Generationen eingewirkt hat, ist es ein Kausalfaktor, der prinzipiell von der chemisch-physikalischen Verursachung verschieden ist. Es wird deshalb oft als *ultimate causation* bezeichnet.

Das Resultat ist ein Dualismus jedes Lebewesens. Es besitzt einen Genotyp, der aus DNA (oder RNA) besteht und größtenteils im Zellkern zu finden ist, aber auch einen Phänotypus, das Produkt der Übersetzung des Genotyps während der Ontogenie, in Wechselwirkung mit der Umwelt. Was von Generation zu Generation weitergegeben wird, ist der Genotyp. Was in jeder Generation der Selektion unterworfen ist, ist der Phänotyp. Dieser Dualismus wirft einige interessante philosophische Probleme auf. Zum Beispiel wird oft irreführend gefragt: Was verursacht den Phänotyp, die Gene oder die Umwelt? Oder wie es häufig formuliert wurde: „Is it nature or nurture?“ Die Antwort ist natürlich, daß beide, *nature* und *nurture*, also Genotyp und Umwelt, zur Gestaltung beinahe jeden Aspektes des Phänotyps beitragen. Änderungen in der Umwelt haben oft Änderungen im Phänotyp zur Folge.

Jedoch sind dem Ausmaß, wieweit der Phänotyp variieren kann, gewisse Grenzen gesetzt. Da es gewöhnlich unmöglich ist, diese Grenzen genau festzulegen, kann die ideologische Einstellung eines Autors bestimmen, wie er die relative Wichtigkeit von Genotyp und Umwelt bewertet. Die Behavioristen glaubten an die Allmacht der Umwelt, und das taten auch manche Marxisten, während die Eugeniker

und Rassisten glaubten, daß der Genotyp alles verursache. Hoffen wir, daß wir eines Tages Übereinstimmung über den jeweiligen Beitrag dieser zwei Kausalfaktoren erreichen können.

2 Populationsdenken

Seit Pythagoras und Platon war ein Weltbegriff weitverbreitet, in dem die Unveränderlichkeit der Welt betont wurde. Diese Ideologie wird von den Philosophen als Essentialismus bezeichnet. Die anscheinend so große Variabilität der Welt, so sagten die Essentialisten, besteht in Wirklichkeit nur aus einer begrenzten Anzahl von *natural kinds* (*essences, types*), jeder eine Klasse bildend, deren Mitglieder im wesentlichen identisch, konstant und scharf von den Mitgliedern der anderen Klassen getrennt sind. Variation ist zufällig und unwesentlich.

Essentialismus wurde mit Hilfe des Dreiecks klargemacht. Man wies darauf hin, daß alle Dreiecke letztlich dieselben Haupteigenschaften haben und dadurch von Vierecken und allen anderen geometrischen Figuren unterschieden sind. Es kann kein Zwischending zwischen Dreieck und Viereck geben. Essentialismus wird auch Typologie genannt und ist für das sogenannte typologische Denken verantwortlich. Darwin führte eine völlig neuartige Denkweise ein, die wir jetzt Populationsdenken nennen. Alle Gruppierungen von Lebewesen (einschließlich des Menschen) sind Populationen oder Biopopulationen, die aus einzigartigen, voneinander verschiedenen Individuen bestehen. Keine zwei von den beinahe 6 Milliarden Menschen sind identisch. Populationen unterscheiden sich nicht durch ihre Essenzen, sondern durch ihre Mittelwerte und andere Statistiken. Das Populationsdenken ist eine Denkweise, die völlig verschieden ist von dem typologischen Denken, das den Physikalismus charakterisiert. Einzigartigkeit erlaubt es ferner, die Art von Qualität zu erklären, die nicht quantifiziert werden kann.

3 Die moderne Analyse der Teleologie

Bis vor weniger als 50 Jahren stützten sich alle Autoren, die über die Philosophie der Biologie schrieben, auf Teleologie. Das gilt selbst für Kant in seiner Kritik der Urteilskraft, es gilt auch für alle Evolutionisten, die an Orthogenesis glaubten, wie z. B. Teilhard de Chardin, es gilt für die Vitalisten, wie Driesch und Bergson, und für eine beträchtliche Anzahl von Philosophen.

Die Analyse des höchst mehrdeutigen Wortes *teleologisch* hat in den letzten Jahren aber nachgewiesen, daß der Begriff für fünf voneinander völlig verschiedene Vorgänge gebraucht worden ist. Ich habe leider nicht die Zeit, dies im einzelnen nachzuweisen. Das Endergebnis jedoch ist, daß vier von diesen Vorgängen völlig mate-

realistisch erklärt werden können, daß es aber keinerlei Hinweis für die Existenz einer kosmischen Teleologie gibt. Kosmische Teleologie ist ein metaphysischer Begriff, der in der Philosophie der Biologie keinen Platz hat.

4 Variationsevolution

Vor Darwin glaubte man, daß nur zwei Arten von Evolutionsänderung möglich seien. Die eine war der *Transmutationismus*, auch Sprung-Evolution genannt, in der plötzlich ein neuer Typ durch eine sprungartige Mutation entsteht, die eine neue Essenz darstellt und eine neue *natural kind* oder typologische Art hervorbringt. Transmutationismus hatte noch bis zur Mitte dieses Jahrhunderts einige Anhänger (Goldschmidt, Schindewolf).

Die andere Evolutionstheorie war der *Transformationismus*, bei dem eine allmähliche Änderung der *essence* im Laufe der Zeit zur Transformation einer Art führt. Lamarcks Theorie der Evolution gehört in diese Klasse. In den 80 Jahren nach 1859 war dies die weitverbreitetste Evolutionstheorie.

Darwin schlug eine dritte, gänzlich verschiedene Evolutionstheorie vor, die *variational evolution*. Diese Theorie war mit allen traditionellen Ideen derartig in Konflikt, daß es 80 Jahre dauerte, bis sie von der Mehrzahl der Biologen angenommen wurde. Sie beruht auf Populationsdenken. Laut Darwin (und zahlreichen Beiträgen aus der Genetik und Molekularbiologie) bleibt jedes Individuum in einer Population konstant, aber in jeder sich sexuell fortpflanzenden Generation wird ein neuer Satz von einzigartig verschiedenen Individuen produziert. Nur ein kleiner Bruchteil dieser neuen Individuen überlebt und pflanzt sich fort, weil alle weniger geeigneten Individuen eliminiert werden und eine dauernde Selektion für Fortpflanzungserfolg stattfindet. Darwins Theorie kommt ohne innere Evolutionskräfte aus und ohne Faktoren, die der Evolution eine Richtung geben.

5 Historische Kausalität

Im Gegensatz zur Physik und Chemie ist die Evolutionsbiologie eine historische Wissenschaft. Man beschäftigt sich in der Evolutionsbiologie mit Vorgängen, die in der Vergangenheit durch *chance* (Zufall) und *natural selection* (natürliche Selektion) stattgefunden haben. Man kann diese Vorgänge in keiner Weise durch Gesetze erklären. Statt dessen macht man von einer ganz anderen Erklärungsmethodologie Gebrauch, der sogenannten „*historical narratives*“ (historischen Schilderung). Eine solche *narrative* (Schilderung) besteht aus einer wahrscheinlichen Rekonstruktion (*scenario*) des historischen Vorgangs oder Ereignisses, das zu dem Evolutionsgeschehen führte, welches man zu erklären versucht.

Lassen Sie mich diese Methode anhand des Aussterbens der Dinosaurier veranschaulichen, das am Ende der Kreidezeit vor etwa 56 Millionen Jahren stattfand. Zuerst dachte man, sie seien einer ganz besonders virulenten Epidemie zum Opfer gefallen, gegen die sie keine Immunität entwickeln konnten. Gegen diese Theorie gab es aber mehrere schwerwiegende Einwände, und es wurde deshalb die neue Theorie entwickelt, die Dinosaurier seien einer Klimakatastrophe zum Opfer gefallen. Die Klimatologen fanden aber keinerlei Hinweise für eine so drastische Klimaänderung, und so wurde auch diese Erklärung aufgegeben. Aber als dann Alvarez vorschlug, das Aussterben der Dinosaurier wäre die Folge eines Asteroideneinschlags gewesen, da paßten alle Beobachtungsdaten zu seiner Theorie. Die Entdeckung des Einschlagkraters in Yucatan hat die Alvarez-Theorie weiter gestärkt. Bisher hat man nichts entdeckt, was nicht im Einklang mit ihr steht. Oder betrachten wir einen anderen Fall. Daß die Vögel von den Archosaurian-Reptilien abstammen, wird von niemanden mehr bezweifelt, aber wann das geschah, darüber streitet man sich noch. Nach der einen Theorie zweigten die Vögel vor etwa 200 Millionen Jahren von den thekodonten Reptilien ab. Diese Vorfahren machten Gleitflüge von Baum zu Baum oder von Fels zu Fels. Nach dem anderen Szenario stammen die Vögel viel später von einem Zweig der Dinosaurier ab und erwarben ihre Flugfähigkeit durch schnelles Rennen auf flachem Boden. Die späte Dinosaurier-Abstammung ist zur Zeit wesentlich populärer als die frühe Thecodont-Abstammung. Aus verschiedenen Gründen neige ich trotzdem zur thecodonten Theorie.

6 Mangel an Universalgesetzen in der Biologie

Die Philosophen des logischen Positivismus und logischen Empirizismus nahmen an, daß Universalgesetze, wie das der Schwerkraft, letzthin die Ursache aller Vorgänge wären. Das heißt, daß alle Prozesse streng determiniert sind und daß im Prinzip eine totale Voraussage möglich ist. Obgleich der Glaube an strikten Determinismus im 19. Jahrhundert stark geschwächt wurde, blieb doch der Glaube an Universalgesetze in der Wissenschaftsphilosophie bis zum letzten Drittel des Jahrhunderts dominant.

Die Frage, ob es in der Biologie überhaupt Universalgesetze (wie die der Physik) gibt, ist noch heute heiß umstritten. Daß es in der Biologie allerlei Gesetzmäßigkeiten gibt, ist nicht umstritten. Manche Autoren betrachten diese Gesetzmäßigkeiten als den Gesetzen der Physik ebenbürtig, ihre Gegner sagen, sie seien einfache Tatsachen, wie zum Beispiel der selektive Vorteil von Körpergröße, oder sie seien in Raum und Zeit zu beschränkt, um der Definition eines Gesetzes zu entsprechen, oder schließlich, sie seien zu probabilistisch im Vergleich zu den Universalgesetzen

der Physik. Bisher ist es noch nicht zu einer Synthese dieser sich widersprechenden Ansichten gekommen. Soviel ist jedoch vollkommen sicher, daß in der Biologie Gesetze bei der Theoriebildung eine viel geringere Rolle spielen als in der Physik. Der Hauptgrund dafür ist die viel größere Rolle, die der Zufall in der lebenden Welt spielt. Schon Darwin hatte das erkannt, aber sein Zeitgenosse William Herschel verspottete die natürliche Zuchtwahl als das Gesetz des *higgledy-piggledy*, um seine Einstellung zur Rolle des Zufalls auszudrücken. Die Einzigartigkeit vieler biologischer Vorkommnisse sowie deren historische Natur sind weitere Faktoren, die die Anwendung von Gesetzen erschweren.

Wegen der probabilistischen Natur der meisten Verallgemeinerungen in der Biologie ist es unmöglich, Poppers Methode der *falsification* anzuwenden, denn ein Fall von Nicht-Bestätigung einer Theorie ist vielleicht nur eine von mehreren möglichen Ausnahmen.

In der Biologie sind die meisten Theorien nicht auf Gesetzen begründet, sondern auf *concepts* (Grundideen). Ein paar Beispiele von solchen *concepts* sind: Selektion, Artbildung, Phylogenie, Konkurrenz, Population, Prägung, Angepaßtheit, Mannigfaltigkeit (*biodiversity*), Entwicklung, Ökosystem und Funktion.

7 Beschränkung auf den Mesokosmos

Aufgrund ihrer Erreichbarkeit durch die menschlichen Sinnesorgane kann man drei Welten unterscheiden. Die erste ist der Mikrokosmos oder die subatomische Welt der Elementarteilchen und ihrer Kombinationen. Die zweite Welt ist der Mesokosmos vom Atom bis zum Sonnensystem, und die dritte ist der Makrokosmos oder die Welt der kosmischen Dimensionen. Im Grunde ist nur der Mesokosmos für die Biologie von Belang, obwohl in der Zellphysiologie Elektronen und Photonen manchmal eine Rolle spielen. Soweit ich weiß, hat keine der großen Entdeckungen, die in den letzten 100 Jahren in der Physik gemacht worden sind, irgendwie zum Verständnis der lebenden Welt beigetragen.

8 Die Komplexität biologischer Systeme

Es gibt keine unbelebten Systeme im Mesokosmos, die auch nur annähernd so komplex sind wie biologische Systeme von den Makromolekülen aufwärts. Diese Systeme sind reich an emergenten Eigenschaften, da immer neue Gruppen von Eigenschaften auf jeder Ebene der Integration erscheinen. Eine Analyse trägt fast immer zum Verstehen dieser Systeme bei, doch ist *Reduction* (Reduktion) unmöglich. Biologische Systeme sind offene Systeme, die Prinzipien der Entropie sind

deshalb auf sie nicht anwendbar. Aufgrund ihrer Komplexität haben biologische Systeme eine reiche Ausstattung mit Fähigkeiten, wie Fortpflanzung, Stoffwechsel, Selbstreplikation, Regelsystemen, Zweckmäßigkeit (Anpassung/*adaptedness*), Wachstum und hierarchische Organisation. Nichts dergleichen existiert in der unbelebten Welt.

9 Methodologische Eigenheiten der Biologie

Beobachtung spielt eine wichtige Rolle sowohl in den physikalischen wie in den biologischen Wissenschaften. Das Experimentieren ist die am häufigsten benutzte Methodik in den physikalischen Wissenschaften und das gleiche gilt auch für die funktionelle Biologie, während in der Evolutionsbiologie *historical narratives* methodologisch am bedeutsamsten sind. Es ist eine Methodik, die in den physikalistischen Wissenschaften nur in einigen historischen Zweigen angewandt wird, wie in Geologie und Kosmologie. Die gewichtige Rolle der *historical narratives* in den historischen Wissenschaften ist von den Wissenschaftsphilosophen bisher fast völlig ignoriert worden. Noch bedeutender ist die Tatsache, daß der Vergleich vielleicht die wichtigste und am häufigsten angewandte Methode in den biologischen Wissenschaften ist, von der vergleichenden Anatomie und Physiologie zur vergleichenden Psychologie. Die Molekularbiologie hat dies neuerdings wieder betont, und der Vergleich leistet einen beträchtlichen Beitrag zu fast jeder molekularbiologischen Untersuchung.

Beobachtung und Vergleich sind natürlich auch höchst bedeutende Methoden in den Geisteswissenschaften, und die Biologie spielt deshalb eine erhebliche Rolle als Brückenbauer zwischen den physikalistischen und den Geisteswissenschaften. Die Gründung einer Philosophie der Biologie ist ganz besonders wichtig für die Erklärung von *mind* (Geist) und *consciousness* (Bewußtsein). Die Evolutionsbiologie hat gezeigt, daß hier kein fundamentaler Unterschied zwischen Mensch und Tier existiert. Evolutionistisches Denken und die Rolle von Zufall und Einzigartigkeit werden jetzt auch in den Geisteswissenschaften anerkannt.

10 Die Bedeutung der Biologie für die Kenntnis des Menschen

Bis 1859 bestand beinahe völliger Konsens darüber, daß der Mensch fundamental vom Rest der Schöpfung verschieden ist. Theologen, Philosophen und Wissenschaftler stimmten da völlig miteinander überein. Darwins Theorie der Abstammung aller Arten von gemeinsamen Vorfahren und ihre Anwendung auf den Menschen verursachte hier eine fundamentale Änderung. Man realisierte jetzt, daß der Mensch

ein Mitglied der Affenfamilie ist und, als solches, ein legitimes Objekt von wissenschaftlichen Untersuchungen. Die Konsequenz dieser neuen Einstellung kann man in den modernen Entwicklungen der Anthropologie, Verhaltensbiologie und Soziobiologie sehen.

Was vielleicht am meisten schockierte, war, wie äußerst nah der Mensch mit dem Schimpansen verwandt ist. Aber gerade der Vergleich mit dem Schimpansen hat vieles Menschliche erklärt. Zum Beispiel kann nicht länger geleugnet werden, daß manche Menschen eine angeborene Tendenz zu stark aggressivem Verhalten haben, nachdem man entdeckt hatte, daß es ein ähnlich aggressives Verhalten auch beim Schimpansen gibt. Dagegen haben andere Forscher nachgewiesen, daß Altruismus bei Primaten gleichfalls weit verbreitet ist (Van der Waal 1997), und diese Beobachtung hilft, den Ursprung von Altruismus beim Menschen zu erklären.

Solche Forschungen haben uns gezeigt, daß es vollkommen gerechtfertigt ist, den Menschen mit denselben Methoden zu untersuchen, die bei Tieren angewandt werden. Auf diese Weise ist ein Teil der Philosophie des Menschen in die Biophilosophie eingegangen. Die Anwendung der Ideenwelt der Biologie, vor allem des Populationsdenkens, auf den Menschen, hat in mancher Beziehung eine beinahe revolutionäre Wirkung gehabt.

Es wäre natürlich ein arger Fehler, zum anderen Extrem zu neigen und zu sagen: Der Mensch ist nichts als ein Tier. In Wirklichkeit hat sich der Mensch zu einem einzigartigen Lebewesen entwickelt, das nicht nur durch eine hohe Intelligenz charakterisiert ist, sondern auch durch den Besitz einer richtigen Sprache (mit Syntax), die es ihm erlaubt, seine Kultur späteren Generationen zu übermitteln. Zudem ist der Mensch das einzige Lebewesen, das ein System von ethischen Prinzipien entwickelt hat, worauf schon Darwin hinwies.

Trotz dieser Einzigartigkeiten des Menschen wäre ein engeres Zusammenwirken der Biophilosophie und der Philosophie des Menschen wünschenswert, um herauszuarbeiten, was der Mensch als Produkt der Tierabstammung gemeinsam hat mit dem Endprodukt des Menschwerdens.

Die zwei großen Zweige der Biologie

Bisher habe ich mich darauf konzentriert, die grundsätzlichen Unterschiede zwischen den Wissenschaften der unbelebten und der belebten Natur zu beschreiben. Der Einfachheit halber tat ich so, als ob die Biologie eine einheitliche Wissenschaft wäre, in der dieselben Prinzipien überall in gleicher Weise passen. Ich muß nun diese Vereinfachung etwas korrigieren. In meiner Besprechung des Dualismus wies ich bereits darauf hin, daß alle Organismen zwei verschiedenen Gruppen von Ursachen gehorchen oder, um das etwas anders auszudrücken, zwei verschie-

dene Arten von Erklärung erfordern. Diese zwei Biologien werden gewöhnlich Funktions- und Evolutionsbiologie genannt. Die Funktionsbiologie wird auch oft die Biologie der *proximate causations* (proximate Verursachung) genannt, da sie sich mit Vorgängen beschäftigt, die hier und jetzt stattfinden. Diese Vorgänge betreffen den Phänotypus und haben mit der Übersetzung (*decoding*) des Genotyps in den Phänotyp zu tun. Die Hauptfrage, die die Funktionsbiologie stellt, lautet „wie“.

Der andere große Zweig der Biologie, die Evolutionsbiologie, erforscht die Geschichte des Genotyps und stellt meistens Warum-Fragen, vor allem warum im Sinne von „wozu“. Diese Fragen werden oft als evolutionäre oder *ultimate* Fragen bezeichnet. Bei ihrer Beantwortung ist es das Ziel, die historische Entwicklung des Genotyps zu rekonstruieren.

Viele der früheren Kontroversen in der Biologie wurden dadurch verursacht, daß die eine Gruppe Wie-Fragen beantwortet haben wollte, die andere Gruppe dagegen Warum-Fragen. Zum Beispiel in den 1880er Jahren rebellierten die Entwicklungsmechaniker gegen die rein phylogenetische Behandlung der Embryologie durch Haeckel und seine Schüler. Sie verlangten, daß man stattdessen die Mechanik der Embryonalentwicklung untersuchen sollte, und behaupteten, daß *proximate explanations* (Erklärungen) die einzig gültigen Antworten wären. Es ist jetzt ganz offensichtlich, was es aber bis vor kurzem durchaus nicht war, daß die eine wie die andere Art des Fragens nicht nur legitim ist, sondern daß man die Antwort zu beiden Fragen für ein volles Verständnis aller Aspekte der lebenden Organismen braucht. Funktions- und Evolutionsbiologie sind weitgehend voneinander unabhängig, und ihre Befunde können getrennt voneinander dargestellt werden.

Noch ein paar Worte über die zwei Zweige der Biologie. Die Funktionsbiologie studiert vor allem physiko-chemische Prozesse in Organismen. Ihre Philosophie ist weitgehend der Philosophie der Physik ähnlich. Sie untersucht den Lebensprozeß selbst. Das interessanteste Gebiet der Funktionsbiologie zur Zeit ist das Studium der Regulationsmechanismen, vor allem der *feedback mechanisms*, und der Schritte, die zur Emergenz neuer Eigenschaften führen.

Die Funktionsbiologie wird regelmäßig von den Biophilosophen vernachlässigt. Alle neuen Bücher, die der Biophilosophie gewidmet sind, wie z. B. die von Sober und Ruse, beschäftigen sich fast ausschließlich mit Evolutionsbiologie.

Die Evolutionsbiologie erfaßt sich mit dem Ursprung und der Evolution der lebenden Welt und mit den Mechanismen, die diese Evolution möglich machen. Sie stellt Warum-Fragen im zweifachen Sinn dieses Wortes: Wie kam es so und wozu? Die Selektion, das Grundprinzip der Evolution, ist ein Zwei-Schritte-Prozeß. Beim ersten Schritt wird die genetische Variation produziert, und beim zweiten Schritt, der eigentlichen Selektion, werden die weniger geeigneten Individuen ausgemerzt. Dieses Prinzip operiert auch außerhalb der Evolutionsbiologie, z. B. in der Darwinischen evolutionären Epistemologie.

Das Aufstellen des Prinzips der Selektion führte auch zur Lösung des lange existierenden Problems: Zufall oder Notwendigkeit? Es stellte sich heraus, daß die Selektion beides ist. Beim ersten Schritt, der Produktion von Variation, ist alles eine Sache des Zufalls, der zweite Schritt, die eigentliche Selektion, ist der Notwendigkeit unterworfen.

Ich glaube, ich habe nun überzeugend nachgewiesen, wie gründlich die Lebewelt von der leblosen Materie verschieden ist. Das bedeutet keineswegs eine Rückkehr zum Vitalismus, weil hier durchaus nicht bestritten wird, daß alles in der Welt des Lebens genauso den Gesetzen der Physik und Chemie gehorcht wie die unbelebte Materie. Aber die existierende Wissenschaftsphilosophie behandelt nirgendwo die zahlreichen spezifischen Eigenheiten des Lebens, wie Geschichtlichkeit (*historicity*), genetisches Programm, Populationsdenken und ähnliche mehr. Das ist der Hauptgrund, warum wir eine Philosophie der Biologie brauchen.

Wir müssen nun fragen, gibt es eine solche Philosophie bereits? Die Antwort ist ja und nein. Mit „ja“ will ich ausdrücken, daß wir bereits den größten Teil des konzeptuellen Gerüsts dieser Philosophie haben, aber mit „nein“ gebe ich zu, daß eine konkrete, formale Philosophie des Lebens noch nicht formuliert worden ist.

Und hier berühren wir einen wunden Punkt. Alle früher aufgestellten Wissenschaftsphilosophien, von Carnap und Hempel bis zu Popper, Nagel, Salmon und Kitcher, benützen einen detaillierten logischen Apparat mit Gesetzen, Regeln, Modellen usw. Einige jüngere Autoren jedoch fragen sich, ob ein solcher Apparat nicht nur unnötig, sondern vielleicht sogar hinderlich ist. Jene Apparate gehen auf eine Zeit zurück, als man noch nach der unbedingten Wahrheit suchte und klare Beweise forderte. Jetzt, wo man sich mit *certainty* (Sicherheit) zufrieden gibt und probabilistische Lösungen annimmt, ist eine typologische Logik vielleicht nur störend.

Man muß sich auch fragen, wozu braucht man denn eigentlich eine Philosophie der Biologie? Sicherlich ist es eine ihrer Hauptaufgaben, Regeln über die Konstruktion von Theorien aufzustellen, mit anderen Worten aufzuzeigen, wie man eine gültige Erklärung findet. Und da frage ich mich, warum geht man nicht einfach von der Praxis aus, statt den Weg in der Logik zu suchen?

Wenn man beobachtet, wie ein Biologe, vor allem ein Evolutionsbiologe, eine neue Erklärung findet, so stellt man fest, daß er durch fünf Schritte zu ihr kommt.

Der erste Schritt ist das Sammeln von Beobachtungen, entweder in der Natur oder im Laboratorium. In einigen Gebieten der Biologie, vor allem in der Funktionsbiologie, spielen Experimente eine große Rolle als Quelle von Beobachtungen. In anderen Zweigen, vor allem in den meisten Gebieten der Evolutionsbiologie, sind Experimente unmöglich, und der Vergleich ist die heuristische Methodik.

Die meisten dieser Beobachtungen fügen sich völlig in das existierende Theoriengerüst, aber gelegentlich paßt eine nicht. Das mag eine Ausnahme sein (eine *anom-*

aly), aber manchmal ist es eine Andeutung, daß irgend etwas mit der herrschenden Theorie nicht ganz stimmt. Mit anderen Worten, eine gelegentliche Beobachtung regt zu Fragen an, und dieses Fragenstellen ist der zweite Schritt auf dem Weg zu einer neuen Theorie.

Der dritte Schritt ist, daß man eine vorläufige Antwort auf diese Frage gibt, eine *conjecture*, wie sie Popper nennt, oder ein *historical narrative*. Das ist eigentlich nichts anderes, als was man früher als Arbeitshypothese bezeichnete.

Der vierte und in vieler Hinsicht wichtigste Schritt ist die unaufhörliche Prüfung der vorläufigen Hypothese durch neue Beobachtungen und wo das möglich ist, durch Experimente. Zu diesem Schritt gehört auch ein sorgfältiger Vergleich mit anderen möglichen Hypothesen.

Wenn die Hypothese konsequent bestätigt wird und alle Versuche, sie zu widerlegen, erfolglos waren, dann hält man die vorläufige Hypothese für eine gültige Theorie, und das ist dann der fünfte Schritt. Die meisten biologischen Theorien haben allerdings gelegentliche Ausnahmen, die natürlich nicht als *falsifications* (Widerlegungen) betrachtet werden dürfen.

Die Zeit ist gekommen, wo der Berufsphilosoph sich entscheiden muß, ob und wie die Praxis des theoretisierenden Biologen formalisiert werden kann. Bisher ist der praktizierende Biologe erstaunlich gut ohne eine formelle Struktur ausgekommen. Es kommt hier natürlich ganz darauf an, wie man solche Ausdrücke wie *truth* (Wahrheit), *certainty* (Sicherheit) und Beweis bewertet.

Vielleicht unterscheidet sich die Philosophie der Biologie von der herkömmlichen Wissenschaftsphilosophie mehr durch das, was sie nicht enthält, als durch ihre positiven Gesichtspunkte. Sie schließt nämlich Essentialismus, Reduktionismus, kosmische Teleologie und Determinismus völlig aus. Durch ihre Emanzipation von diesen Konzepten unterscheidet sich die Philosophie der Biologie ganz grundsätzlich von der klassischen Wissenschaftsphilosophie, wie sie noch bis Mitte dieses Jahrhunderts gelehrt wurde.

Ausblick

Zum Schluß möchte ich noch ein paar Worte über die Bedeutung sagen, die diese neue Biophilosophie für den Durchschnittsmenschen hat. Die Biophilosophie spielt eine wichtige Rolle als Brückenbauer zwischen den sogenannten exakten Wissenschaften und den Geisteswissenschaften. Die traditionelle Philosophie, von den Griechen bis zum letzten Jahrhundert, half dem Einzelmenschen, seine eigene Weltanschauung zu entwickeln. Bei diesem Bestreben war keine der Philosophien, die ausschließlich auf Physik, Mathematik und Logik beruhen, wie der logische und empirische Positivismus, irgendwie behilflich.

Und doch brauchen wir alle eine persönliche Philosophie, um ein glückliches und produktives Leben zu führen. Diejenigen, die nicht an einen persönlichen Gott und die Offenbarungen der Bibel glauben können, sind genötigt, ihre eigene Religion oder Weltanschauung zu entwickeln, und für diesen Zweck ist die Biologie der geeignetste Start. Dies im einzelnen darzulegen würde in meiner sowieso schon sehr gedrängten Vorlesung zu weit führen. Erlauben Sie mir jedoch, einen einzigen, aber besonders wichtigen Aspekt der Philosophie der Biologie kurz zu besprechen, nämlich den Stand dieser Philosophie zur Ethik.

Ethik

In sozial lebenden Organismen, wie es der Mensch ist, hat nichts einen höheren Selektionswert als die harmonische Wechselwirkung zwischen den Individuen. Der unvermeidliche Egoismus des Individuums muß durch eine Anteilnahme an dem Wohlergehen der Gemeinschaft gezügelt werden. Zwiespälte, die durch zuviel Egoismus verursacht werden, würden unheilvolle Folgen für die Gruppe haben. Kooperation und Altruismus werden mit besserem Überleben und allgemeinem Wohlergehen der betreffenden Gruppe belohnt. Dabei spielt es keine Rolle, in welchem Grad solch ein Altruismus genetisch veranlagt ist oder gänzlich durch Erziehung in einem prägungartigen Prozeß zustande kommt.

Die menschliche Ethik war also von Anfang an zum Teil eine Gemeinschafts- oder soziale Ethik, und es ist für die Zukunft des Menschen äußerst wichtig, daß es so bleibt. Der Zusammenhang zwischen Evolution und menschlicher Ethik wird oft ignoriert. Von diesem Zusammenhang möchte ich noch einige Konsequenzen ableiten, vor allem die Überzeugung,

(1) daß der Mensch mit all seinen guten und schlechten Eigenschaften das Resultat von selektiver Evolution ist, daß deshalb das letzte Ziel aller unserer Leitsätze und Tätigkeiten sein sollte, das Menschentum zu erhalten und womöglich zu verbessern, und

(2) daß der Mensch, ohne daß er das eigentlich bemerkt hat, zum Verwalter und Beschützer dieser Welt geworden ist und, damit verbunden, ihm die Aufgabe zugewachsen ist, zu sichern, daß er sie nicht schädigt oder ganz ruiniert, sondern alles in seiner Macht Stehende tut, diese herrliche Welt zu erhalten, vor allem ihre wunderbare Mannigfaltigkeit in einer gesunden Biosphäre.

Diese so idealistischen Grundsätze sind eigentlich eine notwendige Konsequenz aus den Befunden der Evolutionsbiologie.

Zum Schluß möchte ich noch die Frage aufwerfen: Was ist wohl die wichtigste Errungenschaft der neuen Biophilosophie? Wie stellt sich die Situation dar, ehe es sie gab?

1959 beklagte der bekannte britische Physiker C. P. Snow die riesige, unüberbrückbare Kluft zwischen den Natur- und den Geisteswissenschaften und viele spätere Autoren haben ihm bis auf den heutigen Tag zugestimmt. Dieser Kluft zwischen den zwei Wissenschaften (in Wilhelm Humboldts Sinn dieses Wortes) entsprach eine Barriere zwischen einer auf Physik gegründeten und einer auf den Geisteswissenschaften beruhenden Philosophie. Ich hoffe, daß es mir gelungen ist zu zeigen, daß diese Trennung eigentlich gar nicht existiert, zum mindesten, daß die Biologie eine Brücke bildet und die weitere Ausgestaltung einer Philosophie der Biologie das gegenseitige Verstehen beider Lager weiter fördern wird. Und das sollte die zur Zeit noch bestehende Kluft zwischen Natur- und Geisteswissenschaften überwinden helfen, bis wir schließlich eine vereinte Wissenschaft haben, im weitesten Sinne des Wortes. Darauf müssen wir hinarbeiten!

Literatur

- Goldschmidt, R.: *The Material Basis of Evolution*, New Haven: Yale University Press, 1940.
- Goudge, T. A.: *The Ascent of Life*, Toronto: University of Toronto Press, 1961.
- Mayr, E.: *Die Entwicklung der biologischen Gedankenwelt. Vielfalt, Evolution und Vererbung*, Berlin, Heidelberg: Springer, 1984.
- Mayr, E.: *The Idea of Teleology*. In: *J. Hist. Ideas*, 53 (1992), S. 117-135.
- Mayr, E.: *Das ist die Biologie*, Heidelberg: Spektrum, 1998.
- Rosenberg, A.: *The Structure of Biological Science*, Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- Ruse, M.: *The Philosophy of Biology*, London: Hutchinson, 1973.
- Snow, C. P.: *The Two Cultures and the Scientific Revolution*, Cambridge: Cambridge University Press, 1959.
- de Waal, F.: *Good Natured*, Cambridge: Harvard University Press, 1996.

Sonstige Beiträge

Werner Albring

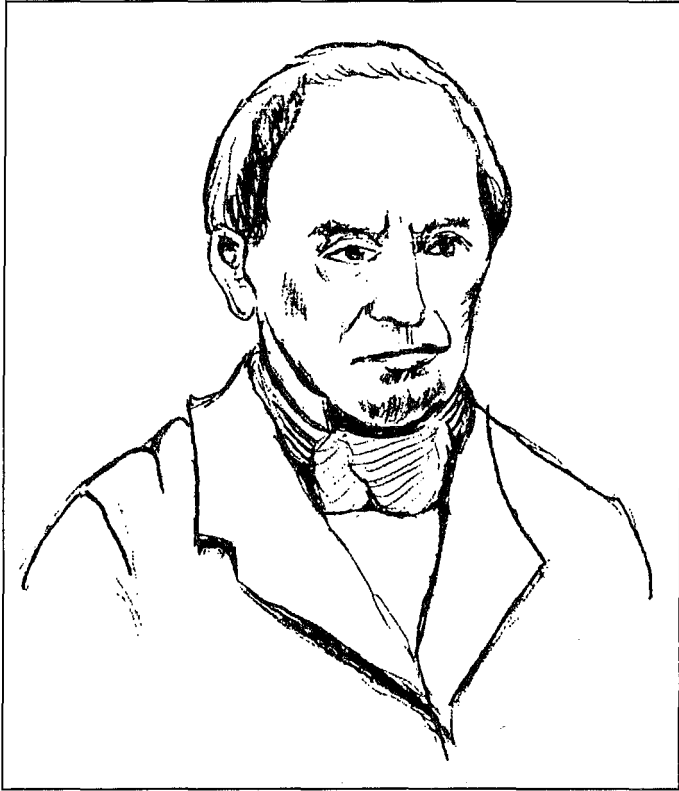
Erinnern an Gotthilf Hagen aus Anlaß des 200. Geburtstages¹

(Vortrag in der Sitzung der Technikwissenschaftlichen Klasse am 17. Oktober 1997)

Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen, einer der herausragenden Vertreter der „Ingenieurkunst“ im neunzehnten Jahrhundert, wird am 3. März 1797 in Königsberg geboren. Er wächst auf in hochgebildeter Familie. Sein Vater, Ludwig Hagen, ist Jurist und Konsistorialrat; ein Bruder des Vaters, auch er heißt Gotthilf Hagen, Doktor der Medizin und der Philosophie, ist Professor für Physik und Chemie an der Universität Königsberg und wirkt frühzeitig auf die wissenschaftliche Neigung und Ausbildung seines gleichnamigen Neffen ein. Der Großvater mütterlicherseits, Gotthilf Christian Reccard, ein Pfarrer, ist Theologe an der Universität. Auf dem Dach des Pfarrhauses hat er eine kleine Sternwarte eingerichtet. Bessel nennt ihn den einzig wahren Astronomen Deutschlands jener Zeit. Dieser Friedrich Wilhelm Bessel, Professor an der Königsberger Universität, ist ein angeheirateter Onkel Hagens. Er regt den Heranwachsenden an, an der Universität nicht nur Jurisprudenz und Philosophie zu belegen, sondern auch seine eigenen Vorlesungen über Mathematik und Astronomie zu hören.

Bessel (1784–1846) war es, der als erster die Fixsternparallaxe beobachtete. Aus veränderter Eigenbewegung des Sirius schloß er schon auf den später entdeckten Begleitstern. Noch heute ist seine Untersuchung einer speziellen gewöhnlichen Differentialgleichung zweiter Ordnung wohlbekannt, die er durch Reihen, später *Besselfunktionen* genannt, löste. Bessel veranlaßt den neunzehnjährigen Gotthilf Hagen, die totale Sonnenfinsternis vom 18. November 1816 zu beobachten und die Ergebnisse in einer Zeitschrift für Astronomie zu publizieren. Die Berliner Akademie spricht eine Anerkennung für diese Arbeit aus. Bessel hätte den jungen Mann gern ganz für die Astronomie gewonnen, doch den zieht es zur Ingenieur-tätigkeit. Später schreibt Hagen über diese Lebensphase in seinen Erinnerungen, er hätte eingesehen, in der theoretischen Astronomie nicht entfernt Bessel gleich

¹ Herrn Dr.-Ing. Peter Albring zum 50. Geburtstag gewidmet



Gotthilf Heinrich Hagen
(3. März 1797 – 3. Februar 1884)

oder ähnlich werden zu können: „Der Meister stand so hoch, daß ich ihm nicht folgen konnte. Seine klare Auffassung der Verhältnisse ließ ihn überall die einfachsten Wege zum Überwinden der Schwierigkeiten erkennen und den Zusammenhang der Erscheinungen erraten.“

Hagen legt die Prüfung zum Feldmesser ab, studiert dann in Berlin das Bauingenieurwesen. Unter seinen akademischen Lehrern kann man den Mathematiker Crelle und den Baumeister Schinkel nennen. Bei letzterem legt er die Prüfung im Fach Land- und Hochbau ab. Hagen berichtet in den Lebenserinnerungen: „Schinkel beurteilte sogleich in humaner klarer Weise jede meiner Antworten. Folgenden Tages sagte ich ihm mit innigster Überzeugung, noch nie in einer Stunde so viel gelernt zu haben, wie in seiner Prüfung.“

Nach bestandenen Prüfungen erhält Hagen ein Stipendium zur Studienreise nach Holland und Frankreich. Er beginnt die Wanderung mit Empfehlungsschreiben von Bessel und Alexander von Humboldt. Doch zuvor prüft er die Wanderfähigkeit in viertägiger Versuchsreise. Er marschiert von Berlin nach Spandau, geht havelaufwärts zum Finowkanal, folgt diesem nach Neustadt-Eberswalde, kehrt zurück über Straußberg, Rüdersdorf und Köpenick. Der große Marsch beginnt 1822. Er besucht Stettin, Lübeck, Hamburg und Bremen. In Bremen wird Hagen auf Empfehlung Bessels vom Arzt und Astronomen Olbers in dessen Sternwarte aufgenommen, dann durch alle naturwissenschaftlichen Sammlungen der Stadt geführt.²

Hagen wandert weiter, er kommt über Oldenburg und Emden nach Amsterdam, Rotterdam und Antwerpen, er besucht Brüssel und Paris. Dort wird ihm auf Empfehlung von Humboldt erlaubt, an den Sitzungen der Académie des Sciences teilzunehmen, er sieht Laplace, Arago, Gay Lussac, Biot und Prony.

Vier Monate sind vergangen. Im folgenden Frühjahr geht es weiter. In Cherbourg studiert er die Hafenanlagen, sein Weg führt über Belgien und Holland nach Wesel, nach Münster, nach Paderborn. Dann wandert Hagen rheinaufwärts bis Schaffhausen, er besucht Zürich, steigt über die Alpen, überwindet den Simplonpaß, gelangt nach Mailand und Venedig. Im Herbst geht es zurück durch Tirol, über München, Linz, Wien, Prag und Dresden gelangt er endlich im Dezember 1823 wieder nach Königsberg.

Derartige Wanderungen junger Leute sind nicht ungewöhnlich, besonders die Handwerksburschen praktizieren das, die Wanderschaft gehört zur Berufsausbildung. Hagen interessiert sich für technische Anlagen an Flüssen und Häfen. Über fachliche Erkenntnisse berichtet er in einem vom preußischen Handelsminister unterstützten Buch *Beschreibung neuer Wasserbauwerke in Deutschland, Frankreich, den Niederlanden und der Schweiz*.

In den folgenden sieben Jahren hat sich Gotthilf Hagen als Ingenieur mit den Hafен-, Dünen- und Seeuferbauten der Stadt Pillau zu beschäftigen. Er heiratet Wilhelmine Auguste, Tochter des in Pillau wohnenden Kaufmanns Hagen, eines weitläufigen Verwandten. Aus der Ehe gehen drei Söhne und eine Tochter hervor. Dann beruft ihn auf Vorschlag seines Lehrers Schinkel die Oberbaudirektion nach Berlin zum Dezernenten der Wasserbauten in Westfalen und im Rheinland. Während dieser Periode berät Hagen auch die Stadt Bremen in Angelegenheiten des Wasserbaus, und er entwirft den vollständigen Hafen für die Kriegsmarine in der Jade bei Wilhelmshaven. Später wird er Dezernent für die Elbe und Ostseeküste. Im Jahr 1842 wählt ihn die Berliner Akademie der Wissenschaften zum ordentlichen Mitglied. Im gleichen Jahr werden Faraday und Gay Lussac zu auswärtigen

² Olbers, einer der erfolgreichsten Amateurastronomen, entdeckte sechs Kometen sowie die Planetoiden Pallas und Vestra.

Mitgliedern berufen. In der Laudatio liest man, daß Gotthilf Hagen die ziemlich seltene Vereinigung mathematisch-physikalischer Kenntnisse mit dem Ingenieur-talent vollbracht habe. Hagens Wahlvorschlag haben drei hochberühmte Mathematiker unterzeichnet: Crelle, Dirichlet und Steiner.³

Ein Jahr später wird Hagen von der Bonner Philosophischen Fakultät zum Ehrendoktor promoviert. Beruflich erreicht er 1869 den höchsten Rang, dann steht er als Oberlandes Baudirektor an der Spitze des Bauwesens in Preußen. Dazu wirkt er als Lehrer an der Königlichen Bauschule, Vorgängerin der Technischen Universität. Nach einem Leben als erfolgreicher Ingenieur stirbt er, siebenundachtzigjährig, am 3. Februar 1884 in Berlin

Das Zeitalter unspezialisierter Ingenieure

Im Jahr 1840 erscheint der erste Band von Hagens *Handbuch der Wasserbaukunst*, 1865 der letzte der achtbändigen Reihe. In der Vorrede liest man: „Die Erfolge, die man herbeiführen will, können zwar in den Gesetzen der Mechanik und der physischen Eigenschaften der Körper ihre Begründung finden, man sucht aber meistens vergeblich in Büchern der Mechanik oder der Physik nach Aufklärung solcher Verhältnisse.“ Zunächst ist der Leser verwundert, in der Büchersammlung keine technische Zeichnung, keine mathematische Auftragung, sondern nur Verbaltext zu finden. Doch das Vermißte wird beigeliefert als besondere, großformatige Sammlung von „Kupfertafeln“. Durchblättert man sie, dann staunt man über die Fülle der bearbeiteten Gebiete. In aller Präzision sind Meßinstrumente gezeichnet. Dazu maschinenbauliche Elemente von Kupplungen über Förderpumpen und Absperrschieber bis zu stark detaillierten Brückenkonstruktionen, Schleusen, Uferbefestigungen, Querschnitten ausströmender Wasserstrahlen, überströmter Wehrkanten, Fördermittel.

Hagen lebte in einer Zeit, als der Ingenieurberuf noch kaum spezialisiert war. In England wirkte Isambard Kingdom Brunel (1806–1859). Er baute einen Tunnel

³ Crelle war Herausgeber der ersten deutschen mathematischen Zeitschrift und eines Journals für Baukunst. Nach Crelles Entwurf wurde die Eisenbahnlinie von Berlin nach Potsdam gebaut. Dirichlet, verschwägert mit der Familie des Komponisten Mendelssohn, war ebenso wie Steiner Professor an der Berliner Universität. Dirichlet entwickelte die allgemeine Theorie der algebraischen Zahlen, er wandte die Analysis auf die Zahlentheorie an, arbeitete an der Theorie unendlicher Reihen sowie an der Potentialtheorie. Steiner gilt als Begründer der synthetischen Geometrie. Der von ihm formulierte *Steinersche Satz* stellt den Zusammenhang zwischen Trägheits- und Zentrifugalmomenten für einen beliebigen Punkt mit Momenten um den Schwerpunkt her.

unter der Themse, schuf die große Brücke über den Avon nahe Bristol mit einer Spannweite von 183 Metern und projektierte die Eisenbahnstrecke Bristol–London. Er konstruierte auch jedes Detail der Bahnhöfe, wählte geeignete Grassorten zum Anpflanzen an Bahndämmen. Auch konstruierte und realisierte er Schiffe von zuvor nie gekannter Größe, so 1858 die „Great Eastern“.

In Frankreich wirkte der Ingenieur Claude Louis Marie Henri Navier (1785–1836). Er arbeitete vorwiegend in der Mechanik des Bauwesens und schuf große Brücken. Er beschäftigte sich mit Grundlagenarbeiten, so der Berechnung des Erddrucks und der Biegefestigkeit. Er führte den Zähigkeitssummanden in die Differentialgleichung für das elementare Kräftegleichgewicht in Strömungen ein. Diesen Summanden schrieb er analog zum Summanden des Gleitens in der Differentialgleichung für den elastischen Festkörper.

Doch auch in Deutschland war der Preuße Gotthilf Hagen mit seiner Vielseitigkeit unter den Ingenieuren keine singuläre Erscheinung. Ich erinnere an den sächsischen Professor Johann Andreas Schubert (1808–1870) in Dresden. An der Technischen Bildungsanstalt hielt er Vorträge über Mathematik, Maschinenlehre, Geodäsie, Brückenbau und Astronomie. Das sind Fächer, von denen heute ein jedes durch besondere akademische Abteilungen oder ganze Fakultäten vertreten wird. Schubert konstruierte für die Strecke Dresden–Leipzig eine Dampflokomotive und ließ sie in seiner Fabrik bauen, dazu eines der ersten Dampfschiffe für die Elbschifffahrt. Er wirkte auch als erfolgreicher Bauingenieur, er konstruierte und überwachte den Bau der großen Eisenbahn-Steinbrücke über das Göltzschtal, die noch heute von Eisenbahnzügen befahren wird.

Angesichts noch nicht vollzogener Spezialisierung findet man in den geschichtlichen Darlegungen von Festkörper- und Hydromechanik sowie in der Bruchmechanik die gleichen Namen. Mit dem Ende des neunzehnten Jahrhunderts hörte das auf, damals setzte eine bis in unsere Tage noch andauernde Spezialisierung auf eng begrenzte Fachrichtungen ein. Im neunzehnten Jahrhundert sprach man noch von der „Ingenieurkunst“, neben naturwissenschaftlichen Kenntnissen schließt sie auch Elemente der Intuition ein.

Hagens Entdeckungen auf dem Gebiet der Strömungsmechanik

So kann auch der Vortragende als heutiger Spezialist für Strömungsmechanik nur Hagens Leistungen auf diesem Fachgebiet sachverständig würdigen. Im ersten Band seines *Handbuchs der Wasserbaukunst* berichtet Hagen auf Seite 214 über die Strömungsformen in Rohren: „In der Hoffnung, daß bei kleinen Rohrleitungen das Wasser den selben Gesetzen wie in großen folgen würde, habe ich vielfach Beobachtungen mit engen Röhren angestellt. Ich erreichte eine sehr große Über-

einstimmung der Versuche unter sich, und sehr deutlich trat ein einfaches und leicht zu erklärendes Gesetz für den Widerstand hervor. Aber meine eigenen Beobachtungen befolgten nur innerhalb einer gewissen Grenze das Gesetz. Sie zeigten große Abweichungen sobald die Grenze der Geschwindigkeit überschritten wurde, und selbige lag für die weiten Röhren weit näher als für die engeren. Ließ ich den Strahl in die Luft ausspritzen, so erschien er gleich dem Strahl aus der Öffnung in der dünnen Wand von unveränderter Form, solange die Geschwindigkeit eine Grenze nicht überschritt, er fing aber sogleich an zu schwanken und zeigte stoßweise verstärkte innere Bewegung, sobald die Druckhöhe oder die Geschwindigkeit größer geworden war. Das aufgefundene Gesetz gilt nur solange, als das Wasser im ganzen Rohr in Spannung gehalten wird, und die inneren periodischen Bewegungen nicht eintreten. Bei allen in der Praxis vorkommenden Fällen geschieht das letztere, und somit sind jene Resultate von keinem unmittelbaren Nutzen für die Praxis.“

Damit hat Hagen ein Phänomen beschrieben, das wir heute als den Umschlag von laminar zu turbulent benennen. Beschrieben also schon 1841, 42 Jahre vor der Publikation von Osborne Reynolds. Reynolds, der vermutlich Hagens Schrift nicht kannte, machte durch Einspritzen einer Farblösung in wasserdurchströmte Glasrohre die innere periodische Bewegung sichtbar. Doch Hagen hat ebenfalls die Bewegung sichtbar gemacht. In einem 1854 in der *Zeitschrift für Bauwesen* abgedruckten Bericht über den Einfluß der Temperatur auf die Bewegung des Wassers in Röhren schreibt er über Versuche mit wasserdurchströmten Glasröhren. Er ließ Sägespäne durchtreiben, bei geringen Drücken schritten diese nur in Achsrichtung fort, während sie bei starkem Druck von einer Seite zur anderen geschleudert wurden und oft in wirbelnde Bewegung kamen. Hagen schließt, daß die Widerstandserhöhung in Zusammenhang steht mit inneren Bewegungen und Wirbeln, die einen wesentlich höheren Energieaufwand bedingen, als der einfachen Translation des Wassers parallel zur Röhrenachse entspricht. Der Fortschritt von Reynolds bestand darin, daß er die Grenze präziserte mit einem dimensionsfreien Festwert des Verhältnisses Geschwindigkeit mal Rohrdurchmesser, dividiert durch die kinematische Zähigkeit des Fluids. Dieses Verhältnis nennen wir *Reynoldszahl*.

Weiterhin kann man aus Hagens Handbuch lernen, daß der Franzose Dubeniat 1786 als erster bemerkte, daß der Widerstand des in Rohren strömenden Wassers nicht dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist; ein späterer Beobachter, Woltmann, gelangte 1791 zum Resultat, der Widerstand sei proportional der Potenz $7/4$ der Geschwindigkeit. Hagen selbst wertete Messungen aus und bestätigte die Feststellung. Heutige Ingenieure beziehen sich bei Fragen zum turbulenten Widerstand in Rohren, der genau Woltmanns und Hagens Ergebnis entspricht, auf

eine Schrift des Prandtl-Mitarbeiters Blasius, veröffentlicht 1913. Zwischen Woltmann und Blasius liegen 122 Jahre.

Schließlich staunt der Strömungsmechaniker unserer Tage, im ersten Band der Wasserbaukunst auf Seite 203 zu lesen, daß Hagen schon über die Wirkung von Diffusoren mit kleinem Öffnungswinkel Bescheid wußte. Er schreibt, daß der Ausfluß aus Behältern mit einem sich konisch erweiternden Rohr, dessen Öffnungswinkel $5^{\circ} 6'$ beträgt, wesentlich gegenüber der einfachen Öffnung sowie einer Öffnung mit zylindrischer Ansatzröhre gesteigert wird. Das Nichtkennen dieser Grenze im Öffnungswinkel zeitigte weitreichende Folgen. Es bestimmte den jungen Ludwig Prandtl (1875–1953), der einen zu stark erweiterten Diffusor bei seiner Arbeit im Industriebetrieb eingesetzt hatte und den erwarteten Druckrückgewinn nicht erzielte, über den Elementarvorgang in der Strömung nachzudenken, der das starke, mit großem Verlust verbundene Verwirbeln provozierte. Das war Prandtls Anstoß zur Ausarbeitung der Grenzschichttheorie, die maßgebend für die Strömungsmechanik des ganzen folgenden Jahrhunderts geworden ist.

*An welche Menschen der Vergangenheit
erinnern sich unsere Zeitgenossen?*

Der vielseitige, hochgeachtete Ingenieur Hagen war nach seinem Tode schnell vergessen. Eine Wende bahnte sich an, als 1925 der Physiko-Chemiker Wolfgang Ostwald in der Kolloid-Zeitschrift die Fußnote schrieb: „Hagen hat im Jahr 1839, also vier Jahre vor Poiseuille (1843), das Gesetz für die laminare Flüssigkeitsbewegung in Rohren gefunden. Obwohl es üblich geworden ist, die Formel Poiseuillesches Gesetz zu nennen, fordert die historische Gerechtigkeit, mindestens vom Hagen-Poiseuilleschen Gesetz zu sprechen.“⁴ Ludwig Prandtl griff diesen Vorschlag auf und bekräftigte ihn in seinem Lehrbuch. Er fügte hinzu, daß die Veröffentlichung des Ingenieurs Hagen anscheinend in Physikerkreisen unbeachtet geblieben sei.

Weiterhin wurde 1934 durch ein von der Preußischen Akademie des Bauwesens veranlaßtes Buch von E. Ottmann mit dem Titel *Gotthilf Hagen. Der Altmeister der Wasserbaukunst* an Hagen erinnert.

Auch die Dresdener Strömungsmechaniker trugen dazu bei, die Erinnerung an Hagen zu pflegen. Schon in der ersten Auflage des Lehrbuchs *Angewandte Strö-*

⁴ Der Franzose Jean Louis Ferdinand Poiseuille (1799–1869) hatte als Mediziner über das Strömen von Blut in Arterien und Venen gearbeitet. Er stellte bei seinen Modellversuchen fest, daß das Fluid an der Wand haftet. Sein Gesetz wurde ausgesprochen als Faktum, daß in engen Röhren das Ausflußvolumen (bei gleichem Druckabfall) der vierten Potenz des Rohrdurchmessers proportional ist.

mungslehre aus dem Jahr 1961 wurde dem bis dahin unbenannten Verhältnis von Druckkraft zur Reibungskraft der Name *Hagenzahl* gegeben. Die Hagenzahl steht damit im gleichen Rang wie die Reynoldszahl als Verhältnis von Trägheits- zur Reibungskraft und die *Froudezahl* als Verhältnis von Trägheits- zur Gravitationskraft. Die Hagenzahl wurde schnell akzeptiert, sie ging ein in die Normen der DDR, man findet sie erklärt im Brockhaus Lexikon der Physik (Leipzig 1971).

Das geringe Interesse, über Wegbereiter des technischen Fortschritts Fakten zu erfahren, wird auch verursacht durch den weitverbreiteten Pragmatismus von Ingenieuren, die meinen, Informationen aus der Geschichte des Fachgebietes nützen nicht beim Lösen aktueller Aufgaben. Anders denken darüber Philosophen und Schriftsteller, bei denen das Erinnern an die Vorgänger sehr viel Interesse weckt.⁵

Ich denke, Gotthilf Hagen wäre nie vergessen worden, hätte er nur ein wenig sein großes schriftstellerisches Talent angewandt, um ein belletristisches Buch zu schreiben, etwa einen Bericht über seine Wanderung quer durch Europa. Ein solches Buch hat Johann Gottfried Seume (1763–1810) verfaßt. *Spaziergang nach Syrakus* heißt der Bericht über seinen in Grimma bei Leipzig begonnenen Marsch. Seume, Student der Theologie und der klassischen Literatur, wurde von hessischen Werberrn gegriffen und zum Soldatendienst in Nordamerika gezwungen, später war er Sprachlehrer in Leipzig und Sekretär eines russischen Generals. Über Seume findet man einen biographischen Bericht im derzeitigen zehnbändigen Brockhaus, nichts aber über Hagen.

Liest man in Hagens *Handbuch der Wasserbaukunst*, dann bemerkt man lange, in glänzendem Stil geschriebene Abhandlungen über die naturwissenschaftlichen Grundlagen des Fachgebietes. Die Informationen über Regen, Quellen, Flüsse, Seen und Ozeane hat er meisterhaft und gedankentief zusammengefaßt. Der Leser wird an die Schreibweise von Hagens Zeitgenossen, dem österreichischen Schriftsteller Adalbert Stifter (1805–1868) erinnert, besonders an dessen im poetischen Realismus verfaßte Naturschilderungen. Vielleicht bestand eine geistige Verwandtschaft, denn Stifter hatte neben der Rechtswissenschaft auch Naturwissenschaft studiert.

In der Gegenwart hat sich der epische Anteil in technisch-naturwissenschaftlichen Berichten weit zurückgebildet. Ich selbst bekam als Student von meinen akademischen Lehrern den Ratschlag, allen verbalen Text zwischen Formeln und Ver-

⁵ Als ich im Jahre 1971 eine Reihe von Vorträgen anlässlich des 150. Geburtstag von Hermann von Helmholtz hielt, ich sprach an der Technischen Universität von Dresden, vor der Mathematischen Gesellschaft und vor dem Plenum der Berliner Akademie der Wissenschaften, konnte ich bemerken, daß das Jahr im Bewußtsein der Öffentlichkeit keineswegs zum Helmholtz-Jahr geworden war – diesen Rang der Popularität hatten die Literatur-Freunde mit dem Schriftsteller Heinrich Mann besetzt zum Erinnern an dessen 100. Geburtstag.

suchsergebnissen im Telegrammstil zu schreiben. Jedoch verkümmern dann technisch-wissenschaftliche Berichte zu Rezeptensammlungen, es fehlen anregende Gedanken zur Weiterentwicklung.

Auf einen anderen Aspekt hat Hagen selbst hingewiesen. Als junger Mann hatte er beim Militärdienst den Kameraden Ramkoff kennengelernt. Die Freundschaft mit dem späteren Juristen und Regierungsrat währte lebenslang. Ihm konnte Hagen über Hochwassermengen und Wahrscheinlichkeitsrechnungen schreiben, beklagend, daß er bei eigenen Fachgenossen nicht genügend teilnehmendes Verständnis fände.

Determination

Bisweilen stellt man beim Lesen von Schriften aus dem vorigen Jahrhundert verwundert fest, wieviel an wissenschaftlichen Grundlagen bereits vorhanden war, was dann als Information von Nachfolgenden nicht übernommen wurde. Unabhängig vom Wissensstand der Vorgänger sind Erkenntnisse neu erarbeitet worden. Vielleicht liegt ein Grund darin, daß große, schöpferische Persönlichkeiten anstehende Probleme selbst durchdenken und lösen wollen, sie sich nicht bemühen, in der Literatur nachzusehen, ob dort vielleicht schon über ein Resultat berichtet wird. Man denke an die Arbeitsweise von Helmholtz, Rayleigh, Föppl, Prandtl und Karman. Doch auch von deren originellen Schöpfungen wurde manches nicht weitergegeben. Helmholtz hatte bereits die komplette Theorie der Ähnlichkeitsmechanik ausgearbeitet. Sie geriet in Vergessenheit und mußte erst in vielen kleinen Etappen von Nachfolgern neu erarbeitet werden.

Das sollte man als Phänomen der Forschungsgeschichte werten, keinesfalls als einen Mangel, dem durch intensiveres Literaturstudium zu begegnen sei. Der über alle Jahrhunderte voranschreitende Fortschritt wird durch das Faktum, daß ab und zu etwas schon Bekanntes vergessen und neu erarbeitet wird, nur ganz unwesentlich beeinflusst.

Wenn man das unspezialisierte Arbeiten von Wissenschaftlern des vorigen Jahrhunderts bedenkt, ein Spitzenmathematiker wie Crelle entwirft eine Eisenbahnlinie und Gotthilf Hagen beschreibt auch die gesamte Technologie des Brückenbaus, der Uferbefestigung, des Verlegens von Rohren, sogar den Antrieb von Schwimmbaggern durch Göpel drehende Pferde in allen Einzelheiten, doch in einer Form, die der heutige Leser noch als unterhaltsame Lektüre wertet, dann wird uns der inzwischen erfolgte Wandel zum engbegrenzten Spezialistentum besonders bewußt. Nicht nur wurde das Gebiet zum schnellen Erreichen von technisch-wissenschaftlichen Zielstellungen in Fachrichtungen gespalten, von denen man heute manche vernünftigerweise rückbilden sollte, darüber hinaus haben sich mit Ein-

führung der Computer manche Ingenieure zum Ausführen von Algorithmen degradieren lassen. Zwar ist der Algorithmus ein willkommenes Mittel zur Denkverkürzung, doch soll er nicht das eigene Denken abschaffen. Das Gegenteil müßte erreicht werden: Durch Zuweisen von Formalarbeit an die Maschine, muß der gewonnene Freiraum für drängendes, kritisches, schöpferisches Denken genutzt werden.

Es ist zu hoffen, daß die gegenwärtige Phase der Stagnation und Umorganisation technisch-industrieller Arbeit dazu führt, daß übertrieben spezialisierte Fachrichtungen in Ausbildung und Forschung abgebaut werden, daß sich technisches Denken wieder zur naturwissenschaftlichen Grundlagenarbeit sammelt, daß Verwalter, die Planstellen abzubauen haben, nicht mehr nach dem Zufallsprinzip dasjenige Institut schließen und seine Mitarbeiter entlassen, dessen Direktor die Altersgrenze erreicht. Vorausschauend sollten die Fakultäten Zielstellungen erarbeiten, welche Fachrichtungen erhalten und welche zurückgebildet werden müssen.

Zurück zu Gotthilf Hagen. Trotz aller bewundernswürdigen Leistungen war Hagen im zwanzigsten Jahrhundert so gut wie vergessen. Doch an welche Menschen aus der Vergangenheit erinnern sich unsere Zeitgenossen? Die große Allgemeinheit ist leicht zu interessieren, Anteil zu nehmen am Schicksal von Menschen, deren Schöpfungen noch in der Gegenwart einen bequem aufnehmbaren Unterhaltungswert zeigen. In solcher Form lassen sich Arbeitsergebnisse von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern nicht vorführen. Doch man findet andere Möglichkeiten. Man könnte Texte von Wissenschaftlern der Vergangenheit in Schulbücher einfügen, in denen man bis heute vorwiegend Auszüge aus der schöngeistigen Literatur findet. Welche Schätze könnten geboten werden mit den physikalisch-mathematischen Lehrbriefen, die Leonard Euler (1707–1783) verfaßte, die als Buch unter dem Titel *Briefe an eine deutsche Prinzessin* publiziert worden sind, und auch mit den beschreibenden Texten Gotthilf Hagens, die in lebendig anschaulicher Weise Gedanken vermitteln und zum Denken anregen. Das als Komponente des Erziehungsprozesses, der nicht Ingenieure und Naturwissenschaftler heranbilden darf, die nur Formelsammlungen nutzen und algorithmisch arbeiten, sondern die selbständig denken.

Und mit solcher Schlußfolgerung kann das Studium von Lebensumständen und Lebenserfahrungen bemerkenswerter Persönlichkeiten der Vergangenheit auch das Schaffen gegenwärtiger Ingenieure beleben.

Literatur

- Albring, W.: Angewandte Strömungslehre. 1. Auflage, Dresden–Leipzig: Verlag Th. Steinkopf, 1961.
- Buchheim, G. & R. Sonnemann: Lebensbilder von Ingenieurwissenschaftlern, Leipzig: Fachbuchverlag, 1989.
- Hagen, G.: Handbuch der Wasserbaukunst. 1.–4. Bd. Königsberg: Verlag Bornträger, 5.–8. Bd. Verlag Ernst und Korn.
- Ottmann, E.: Gotthilf Hagen. Der Altmeister der Wasserbaukunst, Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, 1934.

Anhang

Hinweise zu den Autoren

Albring, Werner, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult., geb. 1914; Professor Emeritus; Hauptfachrichtung/Hauptarbeitsgebiete: Strömungsmechanik/Strömungsprobleme der Turbomaschinen, Turbulenzforschung; dienstlich: Technische Universität Dresden, Institut für Strömungsmechanik, Mommsenstr. 13, 01069 Dresden; privat: Münzmeisterstr. 14a, 01217 Dresden

Beitz, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h., geb. 1935; o. Universitätsprofessor; Hauptfachrichtung/Hauptarbeitsgebiete: Konstruktionstechnik/Rechnereinsatz in der Konstruktion (CAD): Konstruktionsleitsysteme, Simultaneous Engineering, Berechnungs- und Gestaltungsprogramme, Wissensbasierte Systeme für Maschinenelemente und Gestaltungsfragen. Allgemeine Konstruktionsmethodik: Produktplanung, Recyclinggerechtes Konstruieren, Arbeitstechnik und Anspruch. Entwicklung und Untersuchung von Maschinenkomponenten: Schnellverbindungstechnik, Schraubenverbindungen, Welle-Nabe-Verbindungen, Kunststoffzahnrad, Neue Werkstoffe im Maschinenbau; dienstlich: Technische Universität Berlin, Institut für Maschinenkonstruktion/Konstruktionstechnik, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, Tel.: 0 30/31 42 33 41, Fax: 0 30/31 42 64 81, e-mail: beitz@kt10.kf.tu-berlin.de

Dittmann, Achim, Prof. Dr.-Ing. habil., geb. 1941; Institutsdirektor des Instituts für Thermodynamik und TGA an der TU Dresden; dienstlich: Technische Universität Dresden, Institut für Thermodynamik und TGA, 01062 Dresden, Tel.: 03 51/4 63 47 11, Fax: 03 51/4 63 71 05, e-mail: mischke@mtnv01.mw.tu-dresden.de

Fratzscher, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing. habil., geb. 1932; Professor für Technische Thermodynamik, Institutsvorstand; Hauptfachrichtung/Hauptarbeitsgebiete: Technische Thermodynamik, Energietechnik, Kerntechnik, Allgemeine Probleme der Verfahrenstechnik, Grundlagen der Wärmeübertragung; dienstlich: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachbereich Verfahrenstechnik, Institut für Thermodynamik, Energietechnik und Strömungsmechanik, 06099 Halle, Tel.: 0 34 61/46 28 06, Fax: 0 34 61/46 28 53

Haftendorn, Helga, Prof. Dr., geb. 1933; Universitätsprofessorin für Politische Wissenschaft, insbesondere Theorie, Empirie und Geschichte der auswärtigen und internationalen Politik, Leiterin der Arbeitsstelle Transatlantische Außen- und Sicherheitspolitik, Mitglied des Wiss. Direktoriums des Forschungsinstituts der Deutschen Gesellschaft für Auswärtige Politik; Hauptfachrichtung/Hauptarbeitsgebiete: Politische Wissenschaft/Außen- und Sicherheitspolitik, Theorien der Internationalen Beziehungen, Zeitgeschichte; dienstlich: Freie Universität Berlin, Institut für Internationale Politik und Regionalstudien, Ihnestr. 21, 14195 Berlin, Tel.: 0 30/8 38 55 27, Fax: 0 30/8 38 41 60, e-mail: atasp@zedat.fu-berlin.de

Helmchen, Hanfried, Prof. Dr. med., geb. 1933; Geschäftsführender Direktor der Psychiatrischen Klinik und Poliklinik; Hauptfachrichtung/Hauptarbeitsgebiete: Humanmedizin, Psychiatrie/Epilepsie, Depression, Alkoholismus, Demenz, psychiatrische Pharmakotherapie, methodische Probleme der psychiatrischen Diagnostik und Klassifikation, ethische Fragen in der Psychiatrie; dienstlich: Freie Universität Berlin, Psychiatrische Klinik und Poliklinik, Eschenallee 3, 14050 Berlin, Tel.: 0 30/84 45 87 00, Fax: 0 30/84 45 87 26

Hüttl, Reinhard, Prof. Dr., geb. 1957; Leiter des Lehrstuhls für Bodenschutz und Rekultivierung, Prorektor; Hauptfachrichtung/Hauptarbeitsgebiete: Umweltwissenschaften, Forstwissenschaften/Bodenschutz, Rekultivierung, Waldökologie; dienstlich: Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik, Universitätsplatz 3-4, 03044 Cottbus, Tel.: 03 55/69 21 17, Fax: 03 55/69 23 23, e-mail: huettl@umwelt.tu-cottbus.de

Kaufmann, Stefan H. E., Prof. Dr. rer. nat., geb. 1948; Direktor am MPI für Infektionsbiologie; Hauptfachrichtung/Hauptarbeitsgebiete: Infektiologie/Immunantwort gegen intrazelluläre Bakterien, Impfstoffentwicklung; dienstlich: Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie, Monbijoustr. 2, 10117 Berlin, Tel.: 0 30/ 28 02 62 10, Fax: 0 30/28 02 62 12, e-mail: kaufmann@mpiib-berlin.mpg.de

Mayr, Ernst, Prof. Dr. Dr. h. c. mult., geb. 1904; Alexander Agassiz Professor for Zoology (Emeritus), Ehrenmitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften; Hauptfachrichtung/Hauptarbeitsgebiete: Ornithologie, Evolutionsbiologie; privat: 207, Badger Terrace, Bedford, MA 01730, USA, Tel.: 0 01/7 81/2 75 97 77

Queisser, Hans-Joachim, Prof. Dr. rer. nat., geb. 1931; Direktor am MPI für Festkörperforschung in Stuttgart und Honorarprofessor an der Universität Stuttgart; Hauptfachrichtung/Hauptarbeitsgebiete: Physik der Halbleiter/Element- und Verbindungshalbleiter-Materialien, Kristallzüchtung, Epitaxie, Defekte und Realstruktur der Halbleiter, Materialcharakterisierung. Elektronische Eigenschaften, Grundlagen elektronischer Bauelemente, Optoelektronik, Solarzellen; dienstlich: Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Heisenbergstr. 1, 70569 Stuttgart, Tel.: 07 11/6 89 16 00, Fax: 07 11/6 89 16 02, e-mail: queisser@quasix.mpi-stuttgart.mpg.de

Spur, Günter, Prof. em. Dr. h. c. mult., Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing., geb. 1928; Universitätsprofessor Emeritus und Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (bis 31. August 1997); Hauptfachrichtung/Hauptarbeitsgebiete: Produktionstechnik/Konstruktionstechnik, Werkzeugmaschinen, Fertigungstechnik, Steuerungstechnik, Automatisierungstechnik, Produktionsplanung, Informationstechnik, Produktionsorganisation, Arbeitswirtschaft; dienstlich: Technische Universität Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin, Tel.: 0 30/39 00 61 66, Fax: 0 30/3 99 65 72, e-mail: spur@ipk.fhg.de

Wehner, Rüdiger, Prof. Dr., geb. 1940; Direktor des Zoologischen Instituts und Ordinarius für Zoologie; Hauptfachrichtung/Hauptarbeitsgebiete: Biologie, speziell Neuro-, Sinnes- und Verhaltensphysiologie/Neurobiologie des visuellen Systems der Insekten, Raumorientierung, Evolution kognitiver Leistungen, Verhaltensphysiologie und -ökologie; dienstlich: Universität Zürich, Zoologisches Institut, Winterthurerstr. 190, CH-8057 Zürich, Tel.: 00 41/1/6 35 48 31, Fax: 00 41/1/6 35 57 16, e-mail: rwehner@zool.unizh.ch