

**SITZUNGSBERICHTE  
DER LEIBNIZ-SOZietät**

**Band 68 • Jahrgang 2004**

trafo Verlag Berlin

ISSN 0947-5850 ISBN 3-89626-494-X

***Inhalt***

***Bemannte Raumfahrt***

*01 Heinz Kautzleben:* Dr. Sigmund Jähn in der Leibniz-Sozietät

*02 Sigmund Jähn:* 25 Jahre deutsche Beiträge zur bemannten Raumfahrt

*03 Karl-Heinz Marek:* Wozu bemannte Raumfahrt?

*04 Hans-Heinrich Müller:* Franz Carl Achard - Chemiker und Physiker der friderizianischen Akademie der Wissenschaften

*05 Lothar Michalowsky:* Alternative weichmagnetische Werkstoffentwicklungen

*06 Rolf Löther:* Zeit und Evolution der Lebewesen

*07 Bodo Krause:* Nutzung formaler Modelle in der Psychologie - als Mathematiker in der psychologischen Forschung

*08 Christian Bauer:* Sportler, ‚dopes‘ und Erythropoietin

*09 Gisela Jacobasch:* Eisen, das Damoklesschwert im Hochleistungssport

10 Nachruf auf Samuel Mitja Rapoport

***Rezensionen***

*11 Lothar Kolditz:* Hans-Heinrich Müller unter Mitwirkung von Corné J. Aertssens und Jürgen Wilke: Franz Carl Achard

12 *Gert Blumenthal*: Colin J. Campbell, Frauke Liesenborghs, Jörg Schindler und Werner Zittel: "Ölwechsel! Das Ende des Erdölzeitalters und die Weichenstellung für die Zukunft"

### ***Erinnerung***

13 *Gerhard Öhlmann*: Günther Rienäcker. Laudatio zu seinem 100.Geburtstag

### ***Debatte***

14 Projektaufgabe "Sichere Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen"

15 *Gert Blumenthal und Dietrich Spänkuch*: Thesen "Zur ökologischen Transformation"

16 Wortmeldungen zu den "Thesen"

Heinz Kautzleben

### **Dr. Sigmund Jähn in der Leibniz-Sozietät**

Am 20.11.2003 hielt der erste Deutsche, der an einer Mission der bemannten Weltraumfahrt teilnahm, in der Klasse Naturwissenschaften einen Vortrag zum Thema „25 Jahre deutsche Beiträge zur bemannten Raumfahrt“. Anlaß war der 25. Jahrestag seines Raumfluges an der Seite von Valerij Bykowskij vom 26.08. bis 02.09.1978 auf dem sowjetischen Orbitalkomplex Sojus 29 – Salut 6 – Sojus 31. Zur Sitzung hatten sich auch zahlreiche Wissenschaftler eingefunden, die die wissenschaftlichen Experimente, die Sigmund Jähn als Forschungskosmonaut der DDR im Orbitalkomplex ausführte, vorbereitet hatten und ausgewertet haben. Dr. Jähn ist seit 1990 als Berater der Europäischen Weltraumagentur ESA für die Vorbereitung ihrer Teilnehmer an der bemannten Weltraumfahrt, insbesondere auf sowjetischen (jetzt russischen) Raumstationen, tätig. Der Vortrag widerspiegelte, daß Dr. Jähn wie kaum ein anderer Kosmo- bzw. Astronaut aus eigener Erfahrung die weltpolitische Dimension der bemannten Raumfahrt zu beurteilen vermag. Deutschland hat mit der Raketenentwicklung für militärische Zwecke entscheidende Voraussetzungen für die Weltraumfahrt geschaffen. Sie wurden nach dem 2. Weltkrieg von beiden konkurrierenden Weltmächten sofort genutzt. Sowohl die Sowjetunion wie auch die USA haben während des „kalten Krieges“ die bemannte Weltraumfahrt als Kennzeichen der technologischen Führungsrolle gefördert, und beide Seiten haben jeweils „ihre Deutschen“ in diesen Streit einbezogen, indem sie ihnen, wenn auch mit mehreren Jahren Verzögerung, die Teilnahme an bemannten Missionen in ihren Raumschiffen ermöglichten. Nach 1990 nutzte das vereinigte Deutschland die Möglichkeit zur Entsendung von Deutschen zur Forschungsarbeit in den jetzt russischen Orbitalstationen. Nachdem die Station Mir nach unerwartet langer Lebenszeit 2001 zum Absturz gebracht werden mußte, beteiligt sich Deutschland im Rahmen der ESA am Aufbau und der Nutzung der Internationalen Weltraumstation ISS. Dr. Jähn schloß seinen Vortrag mit Bemerkungen zur Zukunft der bemannten Weltraumfahrt und insbesondere des deutschen Beitrages dazu. Die Zukunft

ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Diskussion zum Vortrag konzentrierte sich folgerichtig auf diese Fragen. Die Thesen des Vortrages werden nachfolgend publiziert, ebenso der Diskussionsbeitrag von Karl-Heinz Marek.

Im anschließenden Treffen des Arbeitskreises Geo-, Montan-, Umwelt- und Astrowissenschaften wurde empfohlen, die Diskussion in der Sozietät in geeigneter Weise fortzuführen. Die bisherige Diskussion erbrachte folgende generelle Aussagen zur bemannten Raumfahrt und ihrer Zukunft: In den über vier Jahrzehnten seit dem ersten Weltraumflug von Jurij Gagarin wurde bewiesen, daß Menschen im Weltraum nur existieren können, wenn sie von der Erde aus versorgt und unterstützt werden. In absehbarer Zeit kann die Menschheit ihren Lebensraum auf der Erde nicht verlassen. Anderweitige Aussagen sind verantwortungslose Spekulationen, die von der Sorge um den Erhalt einer lebensfreundlichen Biogeosphäre ablenken. Die bemannte Weltraumfahrt hat eine Zukunft, deren Größe von den Motiven für das Wirken des Menschen im Weltraum abhängig sein wird. Aus der Sicht von Wissenschaft und Technik wird der Mensch im Weltraum gebraucht: a) für die Ausführung von Pilotversuchen im Raumschiff, b) für die Wartung und Reparatur von automatischen Raumstationen, sofern diese so kompliziert und teuer sind, daß sie nicht von der Bodenstation aus repariert werden können, und c) unersetzlich als Objekt der Forschung. Auf absehbare Zeit wird auch noch das nationale Prestigestreben motivierend wirken. Es wird durch analoge private Interessen ergänzt werden. Schließlich dürfte die bemannte Weltraumfahrt auch in der Unterhaltungsindustrie (Entertainment) eingesetzt werden.

Sigmund Jähn

## **25 Jahre deutsche Beiträge zur bemannten Raumfahrt**

Kurzfassung des Vortrages in der Sitzung der Klasse Naturwissenschaften am 20. November 2003.

Der 25. Jahrestag des 1. deutschen bemannten Weltraumfluges ist Anlaß für eine Darstellung und Würdigung der deutschen Beiträge zur Entwicklung der bemannten Raumfahrt aus der Sicht eigener Erkenntnisse und Erfahrungen als aktiver Teilnehmer und Mitgestalter der internationalen Zusammenarbeit auf diesem Gebiet, speziell mit der Sowjetunion/Rußland.

Es werden folgende Hauptetappen dieser Entwicklung betrachtet:

1. Das Wirken von Hermann Oberth, der durch seine Arbeiten auf dem Gebiet der Raketen- und Raumflugtechnik zu einem der Begründer der modernen Raumfahrt wurde. Sein 1923 erschienenes Werk „Die Rakete zu den Planetenräumen“ war ein Standardwerk aus der Anfangszeit der Raumfahrtentwicklung. Die persönlichen Begegnungen und Gespräche mit ihm waren für mich ein faszinierendes und nachhaltiges Erlebnis.

2. Die Arbeiten zur Raketenentwicklung für militärische Zwecke an der Heeresversuchsanstalt der deutschen Wehrmacht in Peenemünde seit 1936. Hier erfolgte am 3.10.1942 der erfolgreiche Start der weltweit ersten serienmäßig gebauten und eingesetzten Flüssigkeitsgroßrakete A4 (ab 1944 als Terrorwaffe V2 gegen westeuropäische Großstädte eingesetzt). Viele der hier entwickelten Lösungen einschl. Beutegut wurden nach 1945 in der Großraketechnik in den USA (Leitung: W. v. Braun) und der UdSSR (Gruppe von Grottrup) weit genutzt, u. a. zur Entwicklung von Raketen als Träger für Atomsprenköpfe.

3. Die nach 1945 in den USA und der UdSSR auf dem Gebiet der bemannten Raumfahrt getrennt erfolgten Entwicklungen waren gekennzeichnet durch

- Hervorhebung der Eigenständigkeit dieser Arbeiten in den USA und der UdSSR (Koroljow, Tschertok, Rauschenbach)
- unterschiedliche Schwerpunktsetzungen:

USA: APOLLO-Mondprogramm, Raumtransporter SPACE SHUTTLE

UdSSR: langlebige Raumstationen mit systematischer Steigerung der Aufenthaltsdauer des Menschen im Weltraum ( 1971 SALUT-1: 24 Tage, 1980 SALUT-6: 185 Tage, 1984 SALUT-7: 211 Tage).

4. In den 1970er Jahren setzte die Internationalisierung der bemannten Raumfahrt ein:

- SOJUS-APOLLO-Projekt (während einer Phase der politischen Entspannung)
- internationale Kooperation sozialistischer Länder im Rahmen des INTERKOSMOS-Programms seit 1967
- zwischenstaatliche Vereinigung ESA (1975) als Nachfolgeeinrichtung von ESRO und ELDO (beide seit 1964).
- Strategien auf dem Gebiet der bemannten Raumfahrt:
- INTERKOSMOS-Länder: Bemannte Raumflüge mit internationalen Besatzungen auf den Langzeit-Raumstationen SALUT (UdSSR-Angebot von 1976) mit den Bedingungen
  - Startreihenfolge entsprechend politischer Entscheidungen
  - Initiativen zur Einbeziehung europäischer Astronauten, da SPACE-SHUTTLE-Start erst ab 1981
- ESA-Länder: Nutzung des amerikanischen SPACE-SHUTTLE  
Damit waren prinzipiell sich ergänzende Systeme vorhanden.  
Eine deutsche Beteiligung an der bemannten Raumfahrt war nur im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit denkbar.

5. Im Rahmen des INTERKOSMOS-Programms erfolgte vom 26.8. bis 2.9.1978 der erste gemeinsame Raumflug UdSSR-DDR auf „SOJUS-29 – SALUT-6 – SOJUS-31“ mit der Besatzung V. Bykowski-S. Jähn (damit erster bemannter deutscher Raumflug) und einem international beachteten Programm von 22 wissenschaftlichen Experimenten.

*Wissenschaftliche Experimente beim 1. deutschen Weltraumflug:*

1. Fernerkundung der Erde: MKF-6, Biosphäre
2. Atmosphärenphysik: Polarlichter, Polarisation
3. Materialwissenschaften: Kristallisation, Formzüchtung, Rekristallisation, Sublimation, Gasphasentransport, Glas
4. Medizin, Psychologie: Herzrhythmus („M-38“), Sauerstoffregime, Hörempfindlichkeit („Audio“), Sprache, Zeit, Geschmack, Befragung
5. Biologie: Stoffwechsel, Bakterienwachstum, Vernetzung, Gewebekultur
6. Technologie: Reporter

6. Die erste bemannte ESA-Mission mit dem deutschen Astronauten U. Merbold als 1. Nicht-Amerikaner auf SPACE SHUTTLE „COLUMBIA“ flog vom 28.11. bis 8.12.1983 (Mission FSLP). Hauptaufgabe war die Erprobung des in Deutschland gebauten ESA-Weltraumlabor SPACELAB-1 mit 72 wissenschaftlichen Experimenten auf den Gebieten Astronomie, Plasmaphysik, Atmosphärenphysik, Biologie und Medizin, Werkstoffwissenschaften, Technologie und Erdbeobachtung.

Vom 30.10. bis 6.11.1985 flog unter deutscher Leitung die 1. amerikanisch-deutsche Mission D1 (bilateral) auf SPACE SHUTTLE „CHALLENGER“ mit E. Messerschmidt und R. Furrer. Dabei erfolgte der erfolgreiche Einsatz des SPACELAB-2 mit einem entsprechenden Experimentprogramm.

7. Im Jahre 1990 begann die aktive Zusammenarbeit der Bundesrepublik Deutschland mit der damaligen Sowjetunion:

- beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) bestand ein deutsches Astronautenteam
- Einladung der DLR an die AdW der DDR nach Initiative von U. Merbold
- WTZ-Abkommen zwischen BMFT und AdW der UdSSR, Übereinkunft des Bundeskanzlers mit dem Präsidenten der UdSSR
- Abschluß eines Vertrages zwischen DLR (im Auftrage des BMFT) und NPO ENERGIA (18.4.1990) über ca. 40 Mio. DM
- Vorbereitung eines gemeinsamen Raumfluges UdSSR-BRD auf MIR, nachdem der 2. Flug eines DDR-Kosmonauten nicht mehr in Frage kam  
Deutsche Partner: DARA und DLR

Mission MIR-92 flog mit K.-D. Flade vom 17. bis 24.3.1992.

Der Zerfall der UdSSR und die politischen Veränderungen blieben auf dem Gebiet der Raumfahrt nahezu ohne Einfluß. Es erfolgte ein weiterer Ausbau der Raumstation MIR, speziell für Langzeitflüge.

8. Gleichzeitig wurde die Zusammenarbeit der BRD mit den USA und der ESA (14 Mitgliedsländer) fortgesetzt:

- Als Institution der ESA wird seit 1990 beim DLR das European Astronaut Centre (EAC) betrieben. Gegenwärtig befinden sich 16 ESA-Astronauten aus verschiedenen Ländern im Training (aus Deutschland: Reiter, Schlegel, Ewald, Thiele). Darüber hinaus erfolgt die Ausbildung der deutschen Astronauten im russischen Zentrum ZPK sowie in den USA.
- 16.4.–6.5.1993 erfolgte die D2-Mission mit U. Walter und K. Schlegel auf SPACE SHUTTLE „COLUMBIA“ mit SPACELAB unter deutscher Projektleitung.
- 11.2.–22.2.2000 flog G. Thiele mit der Mission SRTM auf SPACE

## SHUTTLE „ENDEAVOUR“.

### 9. Nutzung der russischen MIR-Station:

- Gemeinsam mit Rußland erfolgten die Missionen EUROMIR-94 mit U. Merbold (3.10.–4.11.1994) und EUROMIR-95 mit R. Reiter (Langzeitaufenthalt vom 3.9.1995 bis 29.2.1996 = 179 Tage)
- Der letzte deutsche Kosmonaut auf MIR war R. Ewald (Mission MIR-97, 10.2.–2.3.1997).

Sowohl für die USA als auch für die ESA war die Möglichkeit gemeinsamer Flüge und die Nutzung der bisherigen Erfahrungen mit der MIR-Station eine unschätzbare vorteilhafte Vorbereitung für künftige Langzeitflüge. Die Flugdauer auf der MIR-Station wurde systematisch ausgebaut ( 1987: 326 Tage, 1988: 365 Tage, 1995: 437 Tage, 1999: 747 Tage durch S. Avdajew bei 3 Flügen).

- Im Zeitraum 1992–2003 haben bisher 11 ESA-Astronauten aus 5 westeuropäischen Ländern (6 x Frankreich, 3 x Deutschland, je 1 x Italien, Belgien und Spanien) an SOJUS-Flügen zu den Raumstationen MIR und ISS (ab 2001) teilgenommen.
- Die Kompatibilität der Entwicklungen in Rußland und den USA wurde durch die Realisierung von 9 Kopplungen der SPACE SHUTTLE's mit der Station MIR bestätigt.
- Das Ende der MIR-Station im Jahre 2001 nach 15 (!) Jahren Betriebsdauer bedeutete keinen Abschluß der Zusammenarbeit zwischen Deutschland und Rußland, obwohl seither keine weiteren gemeinsamen Raumflug-Programme geplant sind.

### 10. Die internationale Zusammenarbeit Deutschlands auf dem Gebiet der bemannten Raumfahrt erfolgt weiterhin mit NASA (USA), RKA (Rußland) und ESA (bezüglich der Internationalen Raumstation ISS).

Schwerpunkt auf diesem Gebiet ist der Abschluß des Aufbaus und die Nutzung der ISS. Neben der Beteiligung an den Raumflügen sind die wichtigsten deutschen Beiträge der Bau des ESA-Labormoduls „COLUMBUS“ (ursprünglich war Kopplung 2004 vorgesehen) und eines wiederverwendbaren Transportsystems ATV.

Der deutsche Anteil am ESA-Beitrag zur ISS beträgt 41%, am gesamten ISS-Beitrag 3%. Auf Grund der von den USA verkündeten finanziellen Einschränkungen erfolgt der weitere Ausbau der ISS mit Verzögerung, die ISS wird zunächst nur mit 2 Besatzungsmitgliedern (ursprünglich geplant: 6) besetzt. Die Versorgungsflüge können z. Z. nur mit russischen SOJUS-Raum-schiffen oder PROGRESS-Transportern erfolgen.

Aussagen zur Zukunft der bemannten Raumfahrt – im Besonderen auch zur weiteren deutschen Beteiligung – sind gegenwärtig mit großen Unsicherheiten behaftet.

Neben den programmatischen Unklarheiten zu Sinn und Nutzen der bemannten Raumfahrt im allgemeinen besteht bei den Raumfahrtnationen gegenwärtig wenig Klarheit über die künftig für die bemannte Raumfahrt verfügbaren finanziellen Ressourcen. Bezüglich eines in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden Fluges zum Mars besteht ein Widerspruch zwischen den technischen Möglichkeiten und den ethisch-moralischen Werten der Menschheit.

Karl-Heinz Marek

## Wozu bemannte Raumfahrt?

Erweiterte Fassung des Diskussionsbeitrags zum Vortrag von Sigmund Jähn in der Sitzung der Klasse Naturwissenschaften am 20. November 2003.

### 1. Visionäre der bemannten Raumfahrt

In seinem 1903 erschienenen Werk „Die Erforschung der Weltenräume mit Hilfe von Rückstoßgeräten“ hat K. E. Ziolkowski (1857–1935), der „Vater der russischen Raumfahrt“ und einer der Raumfahrtspioniere der 1. Generation<sup>1</sup>, die wissenschaftlichen Grundlagen der Raketen- und Raumfahrttechnik entwickelt. Als wichtigste Motivation für seine technischen Vorstellungen betrachtete er neben dem nicht begrenzbareren Erkenntnisdrang des Menschen eine in ferner Zukunft mögliche Umsiedlung menschlicher Zivilisationen in den Weltraum, z. B. im Falle einer Verschlechterung der Existenzbedingungen der Menschheit bzw. der Gefahr der Vernichtung des Lebens auf der Erde infolge großer Katastrophen (Erdbeben, Einschläge von Riesenmeteoriten bzw. -kometen, „Weltuntergang“ o. ä.). Dabei ging er von der Existenz des Lebens als kosmische, d.h. nicht notwendigerweise an die Erde gebundene Erscheinung aus. Bekannt geworden sind seine diesbezüglichen Thesen „Die Erde ist die Wiege des Verstandes (Geistes), aber der Mensch kann nicht ewig in der Wiege bleiben“ und „Der Mensch wird sich auf Dauer nicht mit der Erde begnügen ... er wird das ganze Sonnensystem erobern“ /1/.

Der auf dem Gebiet der Suche nach außerirdischen Zivilisationen führende russische Astrophysiker I. S. Schklowski postulierte darüber hinaus eine generelle Verantwortung der irdischen Menschheit für die Erhaltung vernünftigen Lebens im Universum. Seine Ideen wurden durch die Arbeiten des „Club of Rome“, eines 1968 gegründeten informellen Zusammenschlusses exklusiver Wirtschaftsführer, Politiker und Wissenschaftler aus über 30 Län-

---

1 Dazu gehören auch H. Oberth (1894–1989) und R. H. Goddard (1882–1945).

dem, über die Gefahr einer Selbstvernichtung der Menschheit (atomarer Holocaust) gestützt. Für die Erschließung des kosmischen Raumes durch die irdische Zivilisation gibt er folgende zeitliche Größenordnungen an (nach F. Gehlhar in /1/):

- Errichtung einer außerirdischen Kolonie für 10.000 Menschen in den Librationspunkten des Erde-Mond-Systems 15–20 Jahre
- Errichtung einer künstlichen Biosphäre („Dyson-Sphäre“) im Raum um die Sonne für 10 Mrd. Menschen 250 Jahre
- Erschließung des Sonnensystems 500–2500 Jahre
- Erschließung unserer Galaxis 10 Mio. Jahre
- Erschließung der Metagalaxis<sup>2</sup> 10 Mrd. Jahre.

Visionäre Auffassungen über die Möglichkeiten der Raumfahrt haben u. a. auch die amerikanischen Physiker Gerard K. O'Neill und F. Dyson sowie die bekannten Raumfahrtwissenschaftler J. v. Puttkamer und W. v. Braun (1912-1977) vertreten. Sie sehen in der Raumfahrt und in der Auswanderung von Teilen der Menschheit in Raumkolonien langfristig die Rettung vor den sich auf der Erde vertiefenden sozialen Mißständen und den Rohstoff-, Energie- und Umweltproblemen sowie ggf. auch der Bevölkerungsentwicklung. Bekannt wurden u. a. die Projekte von O'Neill zur Kolonisierung des Raumes zwischen Erde und Mond (1969) und später in noch fernerer Räumen sowie die Vorstellungen von Puttkamers zur Bedeutung der Raumfahrt für das Überleben der Menschheit. Letzterer betont, daß die Potentiale der Raumfahrt als Alternative im evolutionären Entwicklungsprozeß der Menschheit offen gehalten werden müssen: „Jede kurzsichtige Eingrenzung der noch offenen Kulturwachstums-Alternativen ist ein Verbrechen gegenüber zukünftigen Generationen. Deshalb muß es Raumfahrt geben.“/2/

Die USA hatten nach der CHALLENGER-Katastrophe 1986 in ihrem von der NASA entwickelten nationalen Strategieprogramm zur Zukunft der Raumfahrt („Ride-Report“ 1987 /2/) neben

- der Entwicklung von Technologien für ein globales Beobachtungssystem zum Verständnis der Erde als komplexes System („Mission zum Planeten Erde“)

als weitere Hauptaufgaben der Raumfahrt

- die unbemannte Erforschung des Sonnensystems und
- die Ausdehnung der menschlichen Präsenz und der menschlichen Aktivitäten im All („Außenposten auf dem Mond“ und „Menschen zum Mars“)

---

2 Durch astronomische Beobachtungen erfassbarer Raum.

festgelegt. Als Schwerpunkte dieses Programms wurden dabei die folgenden Aktivitäten der bemannten Raumfahrt definiert:

- kurzfristig: Gewährleistung von Forschungsarbeiten auf einer international besetzten Raumstation, speziell zum Langzeitaufenthalt des Menschen im All als Vorbereitung auf spätere Missionen zu Mond und Mars
- mittelfristig: Rückkehr des Menschen zum Mond (permanente Mondbasis bzw. Forschungsstation auf der Mondoberfläche)
- langfristig: bemannte Mission zum Mars.

Von Puttkamer polemisiert darüber: „Die Zukunft des Menschen ist der Weltraum, nicht nur im technologischen Sinn; und sie beginnt mit der Mission zum Planeten Erde... Der Weg in den Weltraum ist also nicht eine Abkehr von der Erde, sondern er führt zu ihr zurück.“ /2/

Trotz aller Kritik an der bemannten Raumfahrt – über die im folgenden noch die Rede sein wird – haben die auf diesem Gebiet führenden Länder Rußland und USA die bemannte Raumfahrt bisher niemals prinzipiell in Frage gestellt – selbst nicht in Zeiten einer erzwungenen restriktiven Finanzpolitik. China hat bekanntlich erst in allerjüngster Zeit seinen praktischen Einstieg in die bemannte Raumfahrt demonstriert. Die NASA hat ebenfalls erst vor kurzem ein spezielles „Institut zur Erforschung und Entwicklung der Eroberung des Weltalls durch den Menschen“ gegründet.

Schließlich soll in diesem Zusammenhang noch auf die Gedanken zu Grenzen und Möglichkeiten bemannter Raumflüge bis zur Version, einst die Milchstraße zu besiedeln, hingewiesen werden, die der deutsche Astronaut U. Walter kürzlich in /7/ dargelegt hat.

## **2. Zweifel und Kritik am Sinn der bemannten Raumfahrt**

Deutliche Ablehnung und Zweifel an der Nützlichkeit der bemannten Raumfahrt kamen bereits vor Jahrzehnten in den Aussagen von bekannten Naturwissenschaftlern und Philosophen zum Ausdruck. So hielt z.B. der deutsche Physiker und Nobelpreisträger Max Born (1882–1970) basierend auf seinen Humanismus-Vorstellungen, bereits in den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts die Raumfahrt mit Ausnahme weniger wissenschaftlicher Nutzwendungen für „völlig sinnlos“, sie sei ein „tragisches Versagen der Vernunft“ und absorbiere nur einen hohen Prozentsatz an menschlicher Intelligenz. /3/ Der amerikanische Kulturphilosoph L. Mumford argumentierte ähnlich, indem er die Raumfahrt als „kolossale Perversion von Energie, Denkkraft u. a. kostbarer menschlicher Fähigkeiten“ und als „raffinierten Versuch, den Wirklichkeiten dieser Erde zu entkommen“ charakterisierte. /3/ Die wirklichen

Menschheitsprobleme, wie Kriegsgefahren, Hunger, Krankheiten, Bildungsmisere u. a. müßten zuerst gelöst werden, bevor man sich den Luxus kosmischer Untersuchungen leisten könne, deren Kosten in keinem vernünftigen Verhältnis zu ihrem Nutzen stünden. Unbemannte Raumfahrt für rein wissenschaftliche Zwecke, wie z.B. für interplanetare Kommunikation, Erforschung des tiefen Weltraums, bessere astronomische Beobachtungsmöglichkeiten u. ä. wäre noch zu rechtfertigen. Bemannte Raumflugkörper seien dagegen „Projektionen morbider militärischer Wahnvorstellungen“. Eine für die Erde nutzbringende Raumfahrt sei kaum vorstellbar.

Trotz der seinerzeitigen Faszination von Millionen Menschen über die sechs bemannten Mondlandungen der USA (1969–1972) wurden letztere nicht selten als Produkte „irregeleiteten Prestigedenkens“ der beiden damaligen Raumfahrtkonkurrenten vor dem Hintergrund ihres kalten Krieges charakterisiert. Sie sollten lediglich der übrigen Welt beweisen, welche der Großmächte auf technischem Gebiet dominiert. Ebenso wurde der amerikanische Raumtransporter SPACE SHUTTLE (seit 1981) als reines Prestigeobjekt, bei dem die Kosten überhaupt keine Rolle spielen, angesehen. Sein Einsatz und praktischer Nutzen ist auch tatsächlich erheblich hinter den lauten Ankündigungen und Erwartungen zurückgeblieben.

Die Raumfahrt wurde auch als „eine der größten Geldvernichtungsmaschinen der modernen Zivilisation“ /4/ bezeichnet. Über Jahrzehnte seien in den führenden Industrieländern gigantische Summen von Steuergeldern versteckt und indirekt in die Rüstungsindustrie geflossen und die Bevölkerung habe von diesen Investitionen nicht profitiert.

Den Hintergrund solcher Ablehnungen der bemannten Raumfahrt bilden meist nicht nur aktuelle Finanzprobleme, sondern gelegentlich auch ein allgemeiner Technikpessimismus bzw. eine gewisse Technikfeindlichkeit. Vor allem der militärische Mißbrauch der Technik (SDI, NMD) und ein abstrakt verstandener Humanismus nähren solche Auffassungen, speziell in der philosophischen Diskussion über das Verhältnis zwischen Mensch und Maschine bzw. Mensch und Technik. Diese Technikfeindlichkeit ist für die bemannte Raumfahrt offensichtlich ebenso unangebracht wie eine übertriebene Technikgläubigkeit (Technikoptimismus). Anfang der 1960er Jahre behauptete z. B. der deutsche Kybernetiker K. Steinbusch, daß es inhuman sei, einen Menschen in den Kosmos zu schicken; dagegen sei die Entwicklung eines Automaten (Roboters) ein humaner Akt. Bereits zu dieser Zeit bestand die Auffassung, daß selbstregulierende automatische Systeme nicht nur jede beliebige Aufgabe der Raumfahrt lösen, sondern dabei sogar bessere Ergebnisse als der Mensch erreichen können – etwa nach dem Motto: der Roboter macht

den Menschen überflüssig. Diese Auffassung ist, wie auch später dargestellt wird, für eine Reihe von wissenschaftlich-technischen Aufgaben tatsächlich zutreffend und liegt fern von den bekannten phantastischen science-fiction-Spekulationen, Utopien und Weltraumabenteuern von Jules Verne u. a.

Aus den verschiedensten Gründen ist die Entwicklung der Raumfahrt jedoch anders verlaufen. Sie hat gezeigt, daß die Verabsolutierung der Möglichkeiten der Technik und die Verdrängung des Menschen aus den Sphären seiner Tätigkeit zu einer Überschätzung der Überlegenheit der Technik führen können (u. a. Raumfahrtkatastrophen).

Ein wesentlicher Kritikpunkt an der bemannten Raumfahrt sind deren hohe Kosten. Die „Grünen“ in Deutschland haben deshalb bereits 1997 die bemannte Raumfahrt als ein „teures Spielzeug“ abgelehnt, das nur den Beteiligten einen Prestigeerfolg bringt und unkontrollierbare Kosten verursacht.

Kosten-Nutzen-Rechnungen sollten in der Raumfahrt – wie bei anderen Forschungen – jedoch kein ausschließliches Kriterium für deren Durchführbarkeit darstellen. Entsprechende Überlegungen sind dennoch – besonders in Zeiten knapper Kassen und im Falle einer nahezu ausschließlichen Finanzierung aus öffentlichen Mitteln – legitim, insbesondere wenn der durch die Gesellschaft bereitzustellende finanzielle Aufwand abschätzbar ist /5/. In der Tabelle sind beispielhaft die Kosten einiger Raumfahrtprojekte aufgeführt.

Kleines Satellitenprojekt	200-300 Mio. US D
Deutsche DI-Mission	200
Großer Forschungssatellit	800
Großlabor (Hubble-Teleskop)	1.600
Entwicklung des SPACE SHUTTLE (bis 1981)	12.000
Apollo-Programm	50.000
ISS: Planungen 1984–1993	10.000
Module 1993–2004	24.000
Internationale Partner	12.000
Starts	15.000
Unterhalt pro Jahr	1.300
Gesamt bis 2004	75.000
Start eines SPACE SHUTTLE (ohne Nutzlast)	450
TITAN 5 (teuerste USA-Rakete)	170
ARIANE 5 (Wegwerf-Rakete)	115
Touristenflug (mit russischem Partner)	20

Tab.: Kosten ausgewählter Raumfahrtprojekte (ergänzt nach /6/)

Daraus ist erkennbar, daß Forschungen mit bemannten Missionen tatsächlich um ein Mehrfaches teurer sind als solche mit unbemannten Satelliten. Allein die Startkosten eines SPACE SHUTTLE übersteigen bei weitem den Wert eines Satelliten. Die Reparatur und Bergung von Satelliten (INTELSAT 6, WESTSTAR u. ä.) durch bemannte Raumfahrtmissionen hatte sich nach /6/ ebenfalls teurer als der Bau eines neuen Satelliten einschl. dessen Neustarts erwiesen. Es wird vielfach beklagt, daß durch die hohen Kosten der SHUTTLE-Starts und der ISS bereits in der Vergangenheit eine ganze Reihe von unbemannten Forschungsmissionen abgesetzt werden mußte.

Die hohen Kosten der bemannten Raumfahrt werden bekanntlich ganz wesentlich durch die zusätzlichen hohen Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen ( Lebenserhaltung, Abschirmung vor kosmischer Strahlung, Ernährung, Wasser, Luft, Kommunikation usw.) bedingt, die auf Grund der Anwesenheit von Menschen an Bord zu erfüllen sind. Darüber hinaus benötigen bemannte Raumfahrtmissionen längere Vorbereitungszeiten und bieten seltenere Startmöglichkeiten.

### **3. Zum bisherigen Nutzen der bemannten Raumfahrt**

Es ist unbestritten, daß die Beurteilung aller wissenschaftlichen Forschungen ausschließlich nach deren Nutzen für die Praxis kein allgemeingültiges Akzeptanz-Kriterium für diese Forschungen darstellen kann. Ein Nutzen kann sich bekanntlich auch im internationalen Niveau der wissenschaftlichen oder der industriell-technischen Leistungsfähigkeit eines Landes niederschlagen.

Im Folgenden wird versucht, die o. g. Vorstellungen der Visionäre und Befürworter einerseits und ihrer Zweifler und Kritiker andererseits an Hand des bisher erkennbar gewordenen Nutzens der bemannten Raumfahrt zu relativieren.

#### **3.1. Politischer Nutzen**

Die ersten drei Jahrzehnte der bemannten Raumfahrt waren nahezu ausschließlich durch den politischen und vor allem militärischen Wettbewerb der Großmächte USA und UdSSR während der Zeit ihres kalten Krieges geprägt. Im Vordergrund standen das Erreichen von Erstleistungen und Rekorden sowie die Steigerung von Nationalbewußtsein (Patriotismus) und nationalem Prestige. Wissenschaftliche Fragestellungen spielten meist eine völlig untergeordnete Rolle. Noch heute gilt die bemannte Raumfahrt als „Aushängeschild“ für eine Hightech-Nation.

### **3.2. Wirtschaftlicher Nutzen**

Bei globaler Kommunikation, Navigation, Umwelterkundung, Wetterprognose u. a. werden heute unbemannte Satelliten, die für den betreffenden Zweck immer weiter optimiert wurden, auf vielfältige Weise bereits kommerziell genutzt. Branchen, wie die moderne Telekommunikation, wurden überhaupt erst durch die Raumfahrt ermöglicht. Die Ergebnisse der Raumfahrt haben bereits in einer Reihe von Ländern, darunter in Deutschland, mit dazu geführt, daß Voraussetzungen für eine nachhaltige staatliche Politik in den Bereichen Umweltschutz, Ressourcenmanagement und Katastrophenvorwarnung geschaffen werden konnten. Insgesamt haben die Erfahrungen der Raumfahrt erfolgreich zur Lösung zahlreicher irdischer Probleme beigetragen, denn diese ist bis heute eine „Raumfahrt für die Erde“ geblieben.

Trotz einer ganzen Reihe von einzelnen, aus der Raumfahrt hervorgegangenen technischen Innovationen – u. a. auf den Gebieten Miniaturisierung, Sensorik, Robotik usw. – sowie von nutzbringenden sog. „Abfallprodukten“ ist ein allgemeiner direkter technisch-technologischer „Spinoff“ (Technologie transfer) mit entscheidenden technologischen Antrieben für die Wirtschaft insgesamt und damit ein umfassender ökonomischer Nutzen der Raumfahrt (außer für die Raumfahrtindustrie selbst) bisher kaum zu erkennen. Die Anwesenheit des Menschen im Weltraum für diesen Zweck ist nach Ansicht vieler Fachleute nicht erforderlich.

### **3.3. Bereicherung des kulturellen Lebens und der Bildung**

Der Erkenntnis- und Wissensdrang ist ein grundlegendes Bedürfnis des Menschen. Für viele gehört die Raumfahrt zu den faszinierendsten Herausforderungen unserer Zeit. Wesentlicher Inhalt der bemannten und unbemannten Raumfahrt ist die Erweiterung des menschlichen Erkenntnishorizonts. Die Wissens- und Erkenntnisgewinnung aus der Raumfahrt, u. a. über die Entstehung des Universums, die Entwicklung des Lebens und über ferne Welten (Mars, Jupitermonde usw.), hat wesentlich und nachhaltig zur Bereicherung unseres kulturellen Lebens beigetragen. Die Faszination, mit dem Verlassen der Erde einen alten Menschheitstraum zu verwirklichen, ist ganz wesentlich auf die bemannte Raumfahrt zurückzuführen.

### **3.4. Zum wissenschaftlichen Nutzen**

Die wissenschaftliche Nützlichkeit wird oft als Begründung für die bemannte Raumfahrt herangezogen, gegenwärtig besonders in Zusammenhang mit Betrieb und Nutzung der seit dem Jahre 2000 im Aufbau befindlichen Internati-

onalen Raumstation ISS, an der 16 Länder beteiligt sind, und die in den nächsten 15 Jahren alle wesentlichen Aktivitäten der bemannten Raumfahrt bündeln soll. Für Forschungsarbeiten an Bord soll ein Zeitanteil von etwa 20% vorgesehen sein. Der Einsatz solcher Stationen bleibt künftig offensichtlich nicht auf ihre gegenwärtige Rolle als internationales Langzeit-Observatorium und -Labor außerhalb der Erdatmosphäre für Forschung, Technologieentwicklung und Nutzenanwendung in den Beobachtungswissenschaften (Erderkundung, Atmosphärenforschung, Klimaforschung, Astronomie), den Lebenswissenschaften (Medizin, Biologie) und der Physik (Materialwissenschaften, Plasmaphysik) begrenzt.

Mit Raumstationen lassen sich für die menschliche Tätigkeit im Weltraum die folgenden vorteilhaften Faktoren nutzen:

- Mikrogravitation/Schwerelosigkeit (in Erdnähe nur bei Parabelflügen für 25 Sekunden erreichbar)
- Hochvakuum ( $10^{-8}$  ...  $10^{-14}$  mm Hg bei 400-500 km Flughöhe)
- freie Sonnenenergie (Licht, Wärme, Strom): 10 x intensiver als auf der Erde
- unbegrenztes Volumen
- unbegrenzte und hindernisfreie Einsehbarkeit bzw. Erreichbarkeit von Erde und Weltraum für Observation, Telekommunikation, Energieübertragung usw.
- Isolation von irdischer Biosphäre (z.B. bei umweltgefährdenden Prozessen o. ä.) u. a.

Darüber hinaus ist die Nutzung einer Raumstation künftig auch als Testfeld zur Erprobung neuer Technologien, sowie als Stützpunkt („Außenstation“), Transportdepot und als Wartungsanlage für lunare und interplanetare Expeditionen vorstellbar.

Zu den wichtigsten Inhalten des Einsatzes von Langzeit-Raumstationen (SALUT-1–7 1971–1984, SKYLAB 1973–1974, MIR 1986–2000, ISS seit 2000) sowie kurzzeitig betriebener Weltraumlabor (SOJUS-APOLLO 1975, SPACELAB-1 1983, SPACELAB-2 1993) gehörte bisher neben den unterschiedlichen Observatoriumsaufgaben vor allem die Durchführung von wissenschaftlichen Experimenten zur Untersuchung der Auswirkungen der Schwerelosigkeit auf den Gebieten Plasmaphysik, Materialforschung, Biologie, Medizin und Technologie (Robotik, Simulationstechnik u. a.) mit dem Ziel einer anschließenden Entwicklung neuer Verfahren und Technologien auf der Erde.

Die bemannte Raumfahrt erweist sich überall dort als erforderlich, wo der Mensch selbst nicht nur Experimentator, sondern zugleich auch Untersuchungsobjekt bei medizinischen einschl. psychologischer Experimente im Weltraum ist.

Wissenschaftliche Experimente auf anderen Gebieten erscheinen dagegen prinzipiell mit Hilfe von Robotern (wie analog auch auf der Erde praktiziert) und damit auch mit unbemannten Raumflugkörpern durchführbar. Voraussetzung ist allerdings, daß solche entweder autonom auf der Basis künstlicher Intelligenz oder von der Erde aus gesteuerte Roboter tatsächlich auch für die jeweiligen hoch spezialisierten Arbeiten zur Verfügung stehen. Dies konnte logischerweise in der Vergangenheit auf Grund des seinerzeitigen Entwicklungsstandes der Technik nur in recht seltenen Fällen erwartet werden (z. B. automatische Version MKF-6 MA).

Auf dem Gebiet der Materialforschung wurde bisher durch bemannte Missionen eine Vielzahl physikalischer Experimente unter den Bedingungen der Mikrogravitation ausgeführt. Dabei wurden wichtige Erkenntnisse zur Grundlagen- und angewandten Forschung über physikalische Abläufe in der Schwerelosigkeit und zur Optimierung von Verfahrenstechniken gewonnen. Es sind allerdings keine Beispiele bekannt, bei denen der Mensch bei diesen Arbeiten nicht prinzipiell durch geeignete Roboter („Robonauten“) ersetzbar gewesen wäre. Oft hat sich bei der Mikrogravitationsforschung die Anwesenheit des Menschen sogar als störend erwiesen.

Wesentliche Aufgaben der Erforschung der Planeten und des tiefen Welt- raumes wurden bisher erfolgreich von unbemannten Satelliten ausgeführt. Bereits die ersten interplanetaren Sonden der 1950er und 1960er Jahre haben die Jahrhunderte langen Bemühungen der Fernrohr-Astronomie und -Astrophysik substantiell ergänzt und verändert. An einem solchen Einsatz der unbemannten Satelliten wird sich auch künftig nichts ändern. Für bemannte Planetenflüge gibt es offensichtlich gegenwärtig aus wissenschaftlichen Gründen keine Notwendigkeit. Ein Nutzen der sich gegenwärtig in der Diskussion befindlichen Marsflüge (Erstflug war von der NASA bis zum Jahre 2019 geplant!) würde vor allem in der Demonstration bestehen, daß Menschen auch praktisch zu einem solchen Schritt fähig und in der Lage sind.

Das seinerzeitige USA-Mondprogramm hatte als nationales Prestigeprojekt in erster Linie das Ziel, bis zum Jahre 1970 Menschen auf den Mond und wieder zurück zu bringen. Es verfolgte leider nur eine bescheidene wissenschaftliche Zielstellung, so daß dafür nach /6/ auch nur in geringem Maße eine substantielle Unterstützung durch die Wissenschaft erfolgt war. Obwohl

durch alle Mondlande-Missionen Instrumentenpakete ALSEP mit Meßgeräten für einen automatischen und von der Erde aus gesteuerten Betrieb an 6 Stellen der Mondoberfläche abgesetzt wurden – was auch mittels unbemannter Sonden möglich gewesen wäre –, betrat der erste Wissenschaftler (Geologe) erst bei der letzten Mission APOLLO-17 den Mond. Wissenschaftlich bedeutsam waren die 384 kg Mondgestein, die an verschiedenen Landeplätzen gesammelt wurden.

### **3.5. Philosophische Erkenntnisse**

Eine der eingangs genannten Visionen der bemannten Raumfahrt besteht darin, langfristig Voraussetzungen für den nächsten evolutionären Schritt in der Menschheitsentwicklung, die in ferner Zukunft liegende Besiedlung des Weltraums durch den Menschen und die Existenz außerirdischer Zivilisationen, zu schaffen. Diskussionen zu diesen heute weitgehend philosophischen Fragen (Erkenntnistheorie, Kosmologie u.a.) entstanden im Zusammenhang mit Überlegungen über die Zukunft der Menschheit in ihrem Entwicklungsprozeß. Es verwundert nicht, daß die o. g. bevorstehenden bemannten Marsflüge, die entsprechend konventioneller Szenarien von einer Raumstation im Erdorbit starten und über jeweils 2 Jahre und 9 Monate (Hin- und Rückflug je 250 Tage, Marsaufenthalt 500 Tage) andauern könnten, von manchen der Visionäre der bemannten Raumfahrt als erste, bescheidene Anfänge in diesem Entwicklungsprozeß angesehen werden.

## **4. Der Mensch im Weltraum - Von der Vision zur Realität**

Der Mensch ist gegenwärtig zu Missionen in den tiefen Weltraum bekanntlich nicht in der Lage. Ursachen dafür sind nicht nur das Fehlen technischer Voraussetzungen und Ausrüstungen für Langzeitflüge, sondern auch die bisher ungelösten psychologischen, physiologischen und ethischen Probleme der menschlichen Existenz im All. Dies wurde besonders durch zahlreiche Studien und Analysen der letzten Jahre bestätigt. Dabei scheint die Vermeidung eines Risikos für Menschenleben möglicherweise keine so entscheidende Rolle zu spielen, da die persönlichen Gefahren den forschenden Menschen auch in der Vergangenheit nicht von seinem Erkenntnisdrang abgehalten haben. Trotzdem wird auch in Zukunft die Mehrzahl der Weltraumaktivitäten, die die Anwesenheit des Menschen im Weltraum nicht unmittelbar erfordern, mit Hilfe von Automaten durchgeführt werden. So wird z.B. die Planetenforschung weitgehend eine Domäne der unbemannten Raumfahrt bleiben.

Andererseits ist eine Reihe von Forschungsarbeiten ohne unmittelbare Präsenz des Menschen im Weltraum nicht vorstellbar. Dazu gehören insbesondere die Lebenswissenschaften und – zumindest noch für längere Zeit – solche Aufgaben, bei denen die Intervention von wissenschaftlich gut vorbereiteten Raumfahrern erforderlich ist. Letzteres ist u. a. dann aktuell, wenn bei der Gewinnung neuer Erkenntnisse komplexe, nicht vorhersehbare (nicht programmierbare) Situationen eine schnelle Entscheidung in einem ebenfalls komplexen Umfeld von stochastischen Prozessen erfordern. Die Motivation zur Befürwortung der bemannten Raumfahrt folgt dabei aus der Auffassung, daß Automaten den Menschen mit seiner Kreativität und seiner Entscheidungs-, Korrektur- und Steuerungsfähigkeit nicht vollständig verdrängen können, und er letztendlich Schöpfer und Beherrscher der Technik bleibt.

Aus allen bisherigen Ausführungen folgt, daß es in der Praxis offensichtlich auf eine optimale, vom jeweiligen Entwicklungsstand der Technik und der medizinisch-ethischen u. a. Voraussetzungen abhängige Kombination beider Komponenten im System Mensch-Automat ankommt. Die Relation zwischen Mensch und Automat und damit zwischen bemannter und unbemannter Raumfahrt wird somit sowohl durch die jeweiligen wissenschaftlich-technischen, als auch die gesellschaftlich-ökonomischen und ethisch-soziologischen Erfordernisse und deren Folgen bestimmt.

Die allgemeine Situation in der Raumfahrt ist heute nicht mehr mit dem Pioniergeist früherer Jahrzehnte vergleichbar. Der Prestigekampf der Großmächte als Antrieb für die Raumfahrtaktivitäten wurde mit der weltpolitischen Wende 1989 beendet. Trotz der auf beiden Seiten zweifellos vorhandenen Zukunftsprojekte hat sich das Entwicklungstempo auf dem Gebiet der Raumfahrt in den letzten Jahren nicht zuletzt wegen finanzieller Engpässe und politischer Entscheidungen zu neuen Prioritäten verringert. Anschauliches Beispiel dessen sind die Verzögerungen beim Aufbau der ISS einschl. bei der Kopplung des deutschen COLUMBUS-Moduls. Heute wird die Raumfahrt durch kommerzielle Zielstellungen und die Dominanz der irdischen Probleme entscheidend beeinflusst.

Künftig muß die Raumfahrt bei hoher Zuverlässigkeit billiger und komfortabler werden. Jenseits der ISS und künftiger Mond- und Marsflüge werden neue Ziele und Programme ohne Prestige- und militärische Nutzungen benötigt.

Die entsprechend den bekannten visionären Vorstellungen in ferner Zukunft liegende Besiedlung des Weltraums durch die Menschheit ist heute in allen Aspekten noch völlig unklar. Es werden sicher noch Jahrzehnte verge-

hen, bis man sagen kann, ob Neil A. Armstrongs erster Schritt auf einen anderen Himmelskörper am 21.07.1969 tatsächlich „ein großer Sprung für die Menschheit“ war.

## 5. Zusammenfassung

Heute wird die Raumfahrt durch kommerzielle Zielstellungen und die Dominanz der irdischen Probleme entscheidend beeinflusst. Kosten-Nutzen-Relationen dürfen auch für die Raumfahrtforschung kein ausschließliches Akzeptanzkriterium darstellen.

Die bemannte Raumfahrt ist für Experimente auf dem Gebiet der Medizin unverzichtbar. In anderen Disziplinen einschl. Planetenforschung gibt es aus wissenschaftlichen Gründen keine prinzipielle Notwendigkeit für die Anwesenheit des Menschen im Weltraum.

In der Praxis der Raumflüge muß die Relation zwischen Mensch und Maschine (Roboter) und damit zwischen bemannter und unbemannter Raumfahrt entsprechend dem jeweiligen technischen Entwicklungsstand und den gesellschaftlichen, ökonomischen und ethisch-soziologischen Bedingungen optimiert werden.

Ob in den philosophischen Vorstellungen zur Zukunft der Menschheit in ihrem evolutionären Entwicklungsprozeß die in ferner Zukunft liegende Besiedlung des Weltraums eine Option darstellt, kann heute noch nicht entschieden werden. Deshalb müssen dafür die Potentiale der bemannten Raumfahrt als eine Alternative offen gehalten werden.

Für die bemannte Raumfahrt sind langfristig neue Visionen, Ziele und Programme ohne Prestige- und militärische Nutzungen erforderlich.

## 6. Literatur

- /1/ F. Gehlhar: Wie der Mensch seinen Kosmos schuf. Aufbau Taschenbuch Verlag, Berlin 1996
- /2/ J. v. Puttkamer: Rückkehr zur Zukunft. Umschau Verlag, Frankfurt / M. 1989
- /3/ G. Siefarth: Geschichte der Raumfahrt. Verlag C. H. Beck, München 2001
- /4/ o. V.: Welt und All. Deutschlands Rolle in der Raumfahrt. In: Bild der Wissenschaft plus, Stuttgart 2001
- /5/ Entschließung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft zur Bemannten Raumfahrt. Bad Honeff, 12.12.1990
- /6/ B. Leitenberger: Bemannte oder unbemannte Raumfahrt. In: [www.bernd-leitenberger.de](http://www.bernd-leitenberger.de) (12.09.2003)
- /7/ U. Walter: Zivilisationen im All. Spektrum - Akademie Verlag, Heidelberg 1999

Hans-Heinrich Müller

### **Franz Carl Achard – Chemiker und Physiker der friderizianischen Akademie der Wissenschaften**

Vortrag in der Klasse Naturwissenschaften am 18.9.2003.

In einem neueren Handbuch unter dem Titel „Friedrich der Große und seine Epoche“ wird festgestellt, dass „die Chemie im friderizianischen Berlin sich durch ihre solide, dogmatisch nicht festgelegte, ja eher theoriefeindliche Experimentaltradition (auszeichnet), aus der gute Beiträge zur angewandten Chemie kamen, für deren unmittelbare Nutzung dem überwiegend agrarischen Land jedoch die Voraussetzungen fehlten. Staatliche Maßnahmen, wie die Förderung des schlesischen Bergbaues oder die Gründung der Königlichen Porzellanmanufaktur griffen hier nur zögernd. Weder die naturwissenschaftlichen Institutionen noch die gewerbliche Anwendung konnten sich mit den französischen Vorbildern messen. Versuche Friedrichs II., Tobern Bergmann oder einen anderen der großen schwedischen Chemiker 1777 für seine Akademie zu gewinnen, schlugen fehl. Mit Ausnahme Ellers und des für das Berg- und Hüttenwesen verantwortlichen Ministers Friedrich Anton von Heynitz besaß niemand aus der unmittelbaren Umgebung des Königs ein sonderliches Interesse an Chemie. Friedrich selbst ließ seine Chemiker bei allzu detaillierter Berichterstattung deutlich wissen, ‚dass Ich es gerne sehe, wenn ihr mich mit solchen Sachen, wie die sind, zufrieden lasset; denn Ich habe mehr Sachen zu thun‘. Als ein junges Fach, dem noch der Ruch des Unakademischen und Handwerklichen anhaftete, fügte sich die Chemie schlecht in den Rahmen der höfischen Gelehrsamkeit, und der Chemiker hatte Mühe, vor seinen Zeitgenossen als ‚homme de lettre‘ zu bestehen.“<sup>1</sup>

Wenn Friedrich II. mit „detaillierter Berichterstattung“ auch verschont bleiben wollte, so hat er sich aber dennoch für chemische und physikalische

---

1 Ein Manuskript mit der sonst üblichen Nennung der Belegstellen von Zitaten stand uns leider nicht zur Verfügung. Den interessierten Leser verweisen wir auf das Buch von Hans-Heinrich Müller über Achard, das in diesem Band von Lothar Kolditz besprochen wird. Dort findet sich auch ein Literaturverzeichnis. (Die Redaktion)

Dinge sehr interessiert, ja er war gewillt, die theoretischen und praktischen Erkenntnisse der chemischen und physikalischen Wissenschaft, der Naturwissenschaft überhaupt, soweit sie seinen staatspolitischen Absichten nicht zuwiderliefen, zum Nutzen des Staats und der Wirtschaft zu verwerten. Er hat es in einer in der Akademie verlesenen Abhandlung vom 27. Januar 1772 zum Ausdruck gebracht, als er schrieb, dass „die Gesellschaft weder der Künste noch der Wissenschaften entbehren kann“ und die Bedeutung der Physik und Chemie für „das wahre Wohl des Staates“ hervorhob. Des Königs Interesse an Physik und Chemie, überhaupt an die damalige, überall vorwärts drängende, meist anwendungsorientierte Forschung der Physik und Chemie wollen wir uns an der Person des Akademiemitgliedes Achard vergegenwärtigen und damit zugleich sein Wirken anlässlich seines 250. Geburtstags würdigen.

Franz Carl Achard oder wie es genau im Taufregister der Französischen Gemeinde zu Berlin geschrieben steht, François Charles Achard, wurde am 28. April 1753, zwei Uhr nachmittags in Berlin, in der Nähe der heutigen Friedrichswerderschen Kirche geboren. Er stammte aus einer hoch angesehenen und wohlhabenden Hugenottenfamilie, und das sowohl mütterlicher- und väterlicherseits. Sein Vater, Guillaume Achard, promovierter Theologe, war Pfarrer an der Friedrichswerderschen Kirche, seine Großonkel Antoine und François Achard waren Mitglieder der Preußischen Akademie der Wissenschaften. Wahrscheinlich haben sie als Paten für die Ausbildung des jungen Franz Carl nach dem frühen Tod des Vaters gesorgt.

Die Kindheit von Franz Carl wurde durch das gemeinschaftliche Miteinander in der französischen Kolonie in Berlin und durch den Siebenjährigen Krieg geprägt. Zweimal wurde Berlin während dieses Krieges, den der bedeutende Erzähler Wilhelm Raabe einen „Weltkrieg des 18. Säkulums“ nannte, durch russische und österreichische Truppen besetzt. Der Krieg hatte Preußen fast an den Rand einer Katastrophe gebracht. Und in diesen schwierigen Zeiten wurde der junge Achard in dem Mikrokosmos Französische Gemeinde bzw. französische Kolonie aufgefangen. Franz Carl, ein kränkliches Kind, hat höchstwahrscheinlich die Bildungsmöglichkeiten in der Französischen Gemeinde genutzt. Dass er das Französische Gymnasium in Berlin besucht hat, ist nicht auszuschließen. Der Besuch einer Universität konnte dagegen nicht nachgewiesen werden. Das fehlende Universitätsstudium würde auch den Mangel an Theoriebildung, an theoretischer Durchdringung und Beherrschung seiner späteren Forschungen und Veröffentlichungen erklären. Diesen Mangel hat er allerdings durch seine ausgeprägte Beobachtungsgabe, seine Experimentierfreudigkeit und seine analytischen Fähigkeiten mehr als

ausgeglichen. Mit 21 Jahren wurde Achard in die „Gesellschaft der Naturforschenden Freunde“ Berlins als Ehrenmitglied aufgenommen. Der Fürsprecher bei der Aufnahme, der Berliner Arzt und Biologe Markus Eliser Bloch, charakterisierte ihn als „einen jungen Gelehrten aus der Französischen Gemeinde, der bloß vom Gelde lebe und lediglich nach seinem Geschmack arbeiten könne und ein eifriger Physikus wäre“. Achard besaß eine naturwissenschaftliche Bibliothek und ein kleines privates physikalisches Labor, und so erfüllte er die Bedingung, nämlich eine naturwissenschaftliche Sammlung zu besitzen, um in die „Gesellschaft der Naturforschenden Freunde“ aufgenommen zu werden. Der „Physik Beflissene“ wissenschaftliche Autodidakt glänzte durch seine physikalischen und chemischen Experimente. Die Ergebnisse seiner intensiven Forschungen und Experimente fanden sich in zahlreichen wissenschaftlichen Abhandlungen zu Themen wie Elektrizität, Verdunstungskälte und Eigenschaften des elastischen Harzes, um nur einige zu nennen, im Publikationsorgan der „Gesellschaft der Naturforschenden Freunde“ oder im Berliner „Journal littéraire“ wieder.

Der eigenwillige, begabte junge Mann von 20 Jahren, voller naturwissenschaftlicher Ambitionen und Begeisterung, bewegte sich also schon in wissenschaftlichen Kreisen, fand hier Berührungspunkte und auch das Sprungbrett für seine wissenschaftliche Laufbahn. Er korrespondierte mit bekannten und angesehenen Gelehrten und Akademiemitgliedern, er trat in Briefwechsel z. B. mit Johann Bernoulli oder Johann Heinrich Lambert, und er machte die für ihn so wichtige Bekanntschaft mit Andreas Sigismund Marggraf, dem Direktor der physikalischen Klasse der Akademie und Leiter des chemischen Laboratoriums. Dank der Fürsprache Marggrafs und nach Zerstreung königlicher Bedenken wurde Achard im Jahre 1776, 23 Jahre alt, als Mitarbeiter Marggrafs eingestellt und damit zugleich als Mitglied in die Akademie, wenngleich zunächst ohne Gehalt, aufgenommen. Marggraf förderte das junge Akademiemitglied und schätzte an ihm „all die Talente, die einen ausgezeichneten Chemiker ausmachen, um nicht zu sagen, eine experimentelle Fähigkeit, gepaart mit unermüdlichem Arbeitseifer und größter Genauigkeit bei den Versuchen“. Marggraf kenne, wie dem König berichtet wurde, „kaum einen qualifizierteren Menschen für die Chemie“.

Am 7. August 1782 starb Marggraf, der letzte bedeutende Chemiker des Zeitalters der phlogistischen Theorie. Das Mitglied der Physikalischen Klasse, der betagte Johann Gottlieb Gleditsch, teilte dem König die Todesnachricht mit und machte sich dabei Hoffnung, die Direktorenstelle von Marggraf einnehmen zu können. Doch die Antwort des Königs war von lapidarer Kür-

ze: „Die Stelle von dem Marggraf kann Gleditsch nicht kriegen, weil er ein Botaniker ist, aber der Achard muss sie haben“. In einem Schreiben vom 9. August 1782 ließ der König Achard wissen: „Ich habe Ihnen versprochen und Mein Versprechen ist heilig. Ich ernenne Sie zum Direktor der Physikalischen Klasse Meiner Akademie der Wissenschaften anstelle des verstorbenen Marggrafs, dessen Tod ich bedauere, und ich zweifle nicht, dass sie alle Kräfte einsetzen werden, um Meine Wahl zu rechtfertigen“. Achard, gerade 29 Jahre alt, war nun Leiter des chemischen Labors und stand an der Spitze der naturwissenschaftlichen Forschung der Berliner Akademie. Seine Wahl zum Direktor der Physikalischen Klasse war gewiss kein Zufall. Er war ein äußerst rühriges Akademiemitglied, emsig in der Forschung, publikationsfreudig und in der Öffentlichkeit bekannt. Er hielt von 1777 bis 1782 allein neunmal auf den zweimal im Jahr gehaltenen „öffentlichen Vorlesungen“ der Akademie, an denen Gelehrte, Gäste und Vertreter des Hofes teilnahmen, Vorträge, fast immer mit chemischen und physikalischen Experimenten verbunden, die herausragende Ereignisse im wissenschaftlichen Leben in Berlin darstellten. Mit seinen neun öffentlichen Vorträgen übertraf er alle übrigen Akademiemitglieder. Wenn die Wahl so häufig auf Achard fiel, dann darf man wohl annehmen, dass er bereits eine maßgebliche Stellung unter den Akademiemitgliedern einnahm.

Als Leiter des chemischen Labors befasste sich Achard mit dem Studium sehr verschiedenartiger Probleme. Er setzte sich mit den Entdeckungen auseinander, die damals gemacht wurden, mit der Entdeckung des Sauerstoffs, des Wasserstoffs, des Kohlendioxyds und Stickstoffs, mit der Isolierung oder Trennung von Gasen, Säuren, Erden und Metallen, mit der aufkommenden Elektrizität. Er berichtete über seine Nachprüfungen, Experimente, Versuche auf den Akademieplätzen und in den „Mémoires“ der Akademie oder in französischen Abhandlungen, die dann immer wieder gesammelt erscheinen. Manche Untersuchungen Achards sind begrifflicherweise nur als Anläufe anzusehen, die unter Benutzung der damals verfügbaren Mittel unmöglich zum Ziele führen konnten, oder nehmen in allzu sanguinischer Weise die Zukunft voraus und überschätzen in ihren Schlussfolgerungen die tatsächlichen Errungenschaften. Noch andere gehen einen wohlüberlegt vorgezeichneten Weg nicht zu Ende, sondern brechen unvermittelt ab, oft ohne ersichtliche Ursache, die vermutlich eine rein äußerliche war. Aber viele zeichnen sich durch richtige Fragestellungen aus, durch rastlose Bemühungen den aufgeworfenen Problemen auf irgendwelche Weise beizukommen, und zwar nicht selten auf ganz neuen, eigenartigen, von den hergebrachten Vorurteilen unbeeinflussten Wegen, sowie endlich durch jene unermüdliche Beharrlichkeit,

die vor unendlich vielen Versuchen nicht zurückschreckt und da, wo es sich der Mühe lohnt, bei der Sache bleibt, bis sie erledigt ist. Doch fragt man sich manchmal, ob er bei der äußerst vielfältigen Breite seiner Forschungen und Versuche nicht seine Kräfte verzettelte und manches daher nur Stückwerk bleiben musste. Aber fast immer lässt er sich bei seinen chemischen und physikalischen Forschungen von dem Grundsatz leiten, dass die „Erfahrung das Orakel der Naturforschung“ ist oder „Erfahrung ist der Wegweiser auf dem Meer der Wahrscheinlichkeiten und Vermutungen“, und man kann Achard durchaus unter die Begründer, zumindest unter die Beförderer oder Verbreiter der modernen Chemie einordnen.

Achards Untersuchungen und Versuche auf dem Gebiet der Chemie und Physik waren sehr vielfältig. Er untersuchte wohl erstmalig die auffallendste physikalische Eigenschaft des Kautschuks, die Dehnbarkeit, wie er aber auch eine „trockene Destillation“ durchführte und bestrebt war, ein geeignetes Lösungsmittel zu finden. Er stellte Zugdehnungsversuche an, um zu sehen, wie sehr sich das elastische Harz, wie man den Kautschuk nannte, ausdehnen kann. Er probierte den Einfluss der Salpetersäure, des Ammoniaks, verschiedener Öle und Alkalien auf Lösung oder Nichtlösung, prüfte die „auflösende Kraft des Äthers“, fand Äthylchlorid als geeignetes Lösungsmittel, und er zog praktische Folgerungen aus seinen Lösungsversuchen, indem er vorschlug, chirurgische und andere Instrumente aus Kautschuk herzustellen und zeigte, wie man Kautschuk in einen formbaren Zustand überführen kann. Achard befasste sich mit der Adhäsionskraft zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten. Die Bestimmung der Kohlensäure, des Sauer- und Wasserstoffs, der Salz- und Schwefelsäure und ihrer Verbindungen gehörten zu seinem Aufgabenbereich, um sie dann für seine eigenen verschiedenartigsten Luft- und Gasexperimente selbst zu erzeugen, indem er z. B. durch Auflösen von Zink in Salzsäure „entzündliche Luft“, also Wasserstoff, produzierte. Er untersuchte die Wirkung von alkalischen Salzen und der Borsäure auf Metalle, er befasste sich mit den Reaktionen zwischen Metallen und Salpeter, er stellte Versuche an, um die Wirkung vegetabilischer Alkalien auf Alaun, Kalk- und Bittersalzerde zu erfahren, er erkundete die Mischung von Kohlenstaub und Salpeter. Zur Luftbestimmung schlug Achard 1784 rasch verbrennenden Phosphor als eudiometrisches Mittel vor, wie er überhaupt zur Gas- und Luftbestimmung neue Messgeräte vorstellte, die die bei der Akademie angestellten Mechaniker nach seinen Angaben anfertigen mussten. Bei vielen seiner Versuche mit Luft- und Gasarten, Salzen und Säuren, die vielfältigen Koch- und Siedeprozessen unterworfen wurden, beobachtete und bestimmte er den Hitzegrad oder die

Temperatur, welche beim Kochen die Lösungen verschiedener Salze annehmen. Dabei gelang Achard die Entdeckung des Siedverzuges, den er 1785 beschrieb. Bei seinen vielen chemischen Versuchen ließ Achard den König wissen, dass, „wenn man chemische Entdeckungen machen will, es notwendig ist, die Experimente zu vervielfachen“ und daher mehr Chemikalien einzusetzen sind, und bat den König zu veranlassen, dass er die benötigten Chemikalien von der Hofapotheke erhalte, was Friedrichs II. Zustimmung fand.

Achard befasste sich vor allem mit dem chemischen Problem, das seine Epoche am stärksten beschäftigte: die Zusammensetzung der Luft, was sich auch zum größten Teil in den *Mémoires* und in seinen Abhandlungen und in den Experimentalvorlesungen in den Sitzungen der Akademie widerspiegelt. Bei all diesen Experimenten und Versuchsreihen ward ihm bewusst, dass die „allermerkwürdigste und ihrer Erkenntnis nach besonders wichtige“ Luft, die „dephlogistierte Luft“, d. h. der Sauerstoff ist, da sie allein die Atmung unterhält, die Verbrennung fördert, eine bedeutsame Rolle im Stoffwechsel spielt und aller Wahrscheinlichkeit nach ein Bestandteil des Wassers ist. Die Entdeckung des Sauerstoffes durch Priestley und Scheele, seine Analyse und Verbindungen benutzte Achard nicht nur zu allerlei Verbrennungsspielerien, sondern auch zu Schmelzversuchen. 1779 hatte er in den *Mémoires* ein neues Mittel angegeben, um mit einer sehr kleinen Menge Kohle oder anderer brennbarer Stoffe eine Hitze zu erzeugen, wie sie sonst nur mit Brenngläsern oder Brennsiegeln von beträchtlicher Größe erhalten werden kann. Er stellte aus Salpeter genügende Mengen Sauerstoff her, füllte damit mehrere untereinander verbundene Tierblasen und schloss an die letztere ein Lötrohr an. Durch sanften Druck auf die Blasen trieb er einen mäßigen Gasstrom gegen die Flamme einer Lampe mit kurzem Docht. Dadurch wurde die Hitze so stark, dass in zwei Sekunden ein Eisendraht von 1/5 Zoll Durchmesser in Tropfen abschmolz. Was Achard hier, wahrscheinlich als Erster, benutzte, war ein kleines Sauerstoffgebläse einfachster Art. Georg Christoph Lichtenberg in Göttingen bestätigte diese Erfindung, als er einem bekannten Arzt eröffnete, dass sich Achard schon vor Ingernhousens Entdeckung der Blase voll dephlogistischer Luft bei der Schmelz-Lampe bedient und Eisen in Fluss gebracht hat. Und bei Lavoisier lesen wir: „Dieser Gedanke, die Wirkung des Feuers durch Verbrennen mit reinem Sauerstoff zu verstärken, muss zweifellos vielen Personen gekommen sein. Man hat mir sogar versichert, dass der berühmte Chemiker Achard ihn in Berlin praktisch angewendet hat.“

Achard machte sich auch um eine bessere Verarbeitung des Platins verdient und war wahrscheinlich der Erste, der kostbare Platinschmelztiegel für Labo-

ratorien hergestellt hat, indem er durch Zusammenschmelzen von Platin mit Arsen, Kalk und Weinsteinkali schiedbares Platin erzeugte, so dass die Chemiker nun auch Versuche bei sehr hohen Temperaturen ausführen konnten.

Mineralische Arbeiten haben Achard über ein Jahrzehnt in Anspruch genommen. Er untersuchte vor allem die stoffliche Zusammensetzung der Edelsteine, nicht die Kristallform. Er veröffentlichte seine Ergebnisse in Edelsteinbüchern, in den Abhandlungen der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, in selbstständigen Büchern in Berlin und in Paris. Er wollte auch Edelsteine künstlich herstellen, diese Versuche waren aber wenig erfolgreich. Die Edelsteinversuche und die Beschäftigung mit den verschiedenen „Erden“ anerkannte die Berliner Akademie, indem sie auf Anweisung des Königs Achard die nicht unbeträchtliche Summe von 700 Talern auszahlte. Nächst den Edelsteinversuchen unternahm Achard auch 40.000 Versuche, um alle bekannten Gesteinsarten zerlegen und zusammensetzen zu können. Er untersuchte Kupfer, Eisen, Blei, Zinn, Zink, Wismut, Arsen, Antimon und Mineralien und fasste seine Ergebnisse in einem dickleibigen Buch unter dem Titel „Recherches sur les Propriétés des Alliages Métalliques“ zusammen. Achard war auch bestrebt, nützliche Metalllegierungen für die Wirtschaft und Rüstung nachzuweisen und anzubieten. Friedrich II. lobte Achard für „das Metall, das aus einer Mischung von Kupfer und Eisen besteht, wunderschön und undurchsichtig“. Er ermutigte Achard zu verstärkten Forschungen, „um ein noch reineres Metall für das Gießen neuer und das Aufarbeiten alter Kanonen“ zu finden.

Größtes Interesse brachte Achard der Elektrizität bzw. den Erscheinungen der Elektrizität entgegen. Er war einer der ersten diesseits der Alpen, unbestritten der erste in Berlin, der Galvanis Versuche über Zuckungen mittelst ungleichartiger Metallhäkchen wiederholte. Zugleich glaubte er, als Physiologe, auch heilende Kräfte in der Elektrizität zu erkennen und unternahm verschiedene Heilungsversuche. So behandelte er einen schwerhörigen Jungen mit „elektrischen Erschütterungsschlägen“ und habe damit Erfolg gehabt. Er hoffte vor allem, mit Hilfe der Elektrizität geistige Fähigkeiten beeinflussen zu können. Friedrich II. äußerte dazu, nicht frei von Ironie, in einem Nachsatz zu einem Schreiben: „Wenn es Ihnen gelingt, durch Elektrizität den Dummen Geist zu verschaffen, sind sie mehr wert als ihr Gewicht in Gold, denn sie wiegen nicht so viel wie der Großmogul“.

Die Einwirkungen der Elektrizität auf den menschlichen Organismus waren es wohl, die Alexander von Humboldt, der sich für die galvanische Elektrizität sehr interessierte, veranlassten, Achard „als genievollen, oft verkann-

ten Physiker, welcher ein Priestleysches Talent im Ersinnen von Experimenten besitzt“ und „welcher mit einem besonderen Scharfsinne im Ersinnen von Experimenten begabt ist“, bezeichnete. Und das Ehrenmitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Adrian Heinrich Graf von Borcke, äußerte sich in einem Brief an Johann Bernoulli vom 10. April 1779, dass Achard „erstaunliche Versuche“ unternimmt; „das ist ein Gelehrter, der unserer Akademie Ehre macht“.

Im Zusammenhang mit seinen chemischen und physikalischen Forschungen galt Achards leidenschaftliches Interesse auch dem Bau von wissenschaftlichen Instrumenten und Geräten. Er konstruierte einen „Elektrizitätsmesser“, der die direkte Messung und Ablesung der „abstoßenden Kraft der Elektrizität und ihres Verhältnisses zur Schwerkraft“ gestattet, wie er auch Differentialmanometer erfand. Achard setzte sich dafür ein, dass der Etat des chemischen Laboratoriums erhöht wurde und „geschickte Mechaniker“ eingestellt wurden, er sorgte für die Anschaffung neuer Geräte und Instrumente und schenkte 1787 der Akademie aus seiner privaten Sammlung 88 Stücke und verkaufte 1791 der Akademie für 675 Taler 300 physikalische Instrumente, es war nach einem Gutachten der Akademiemitglieder Johann Gottlieb Walter und Abel Burja eine Sammlung, „welche die neuesten und besten Instrumente aus fast jedem Teil der Naturlehre enthält“ und „die physikalische Klasse kann sich rühmen, einen schönen und wohlfeilen Zuwachs an Instrumenten erhalten zu haben“.

Als Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften war Achard nicht nur ein Gelehrter, der im Rahmen des Akademiestatuts seinen Forschungsauftrag erfüllte, sondern er war auch an königliche und staatliche Aufgaben gebunden. Ein umfangreicher Briefwechsel zwischen Achard und dem König legt davon ein beredtes Zeugnis ab. Friedrich II. verlangte praxisnahe Lösungen von seinen Naturwissenschaftlern an der Akademie. Die Leibnizsche Maxime „*theoriam cum praxi*“ kann man daher ohne weiteres auf die physikalische Klasse in der Zeit Friedrichs II. übertragen. Und häufig erteilte der König persönlich in seiner Eigenschaft als Akademiepräsident oder auch sein oberstes Verwaltungsgremium, das Generaldirektorium, Forschungsaufträge. So erklärt sich auch, dass Achard sich mit den verschiedensten Themen aus allen Bereichen der Naturwissenschaften auseinandersetzen musste. So errichtete er auf dem Französischen Dom 1784 den ersten Blitzableiter Berlins. Schon 1777 hatte Achard in einem Gutachten das Aufstellen eines „Wetterableiters“ zur Sicherheit der Magazinegebäude am Schlesischen Tor befürwortet. Er musste auf ausdrücklichen Wunsch des Königs Baustoffe

untersuchen und stellte 132 Mörtel- und Kalkversuche an. Er untersuchte ferner im Auftrage der Königlichen Porzellanmanufaktur „Schmelztiegel“ auf ihre Feuerfestigkeit und konnte ein positives Gutachten ausstellen.

Im Jahre 1780 erhielt „Professor Achard“, der „besonders liebe Getreue“, von Friedrich II. den Auftrag, Versuche anzustellen, um den heimischen Tabak zu verbessern. In einem Brachfeld in Lichtenberg, zwischen den beiden Wegen nach Friedrichsfelde und Marzahn, führte Achard auf gepachteten 5 Morgen Land seine Tabakversuche durch. Achard baute nicht nur den langblättrigen Virginia-Tabak an, sondern zog auch rundblättrige Pflanzen aus ungarischen, orientalischen und asiatischen Tabaksamen, wobei er selbst den König von Polen um Tabaksamen bat, der ihm diesen Wunsch erfüllte und Achard wissen ließ, dass seine „Verdienste ihm seit langem bekannt“ wären. In einer Verbindung von Feldversuchen und ihrer statistischen Aufbereitung hat er geprüft, ob der „asiatische Tabak“ unter den Bedingungen Preußens in größerem Umfange angebaut werden könne. Das Ergebnis war positiv, der „asiatische Tabak“ hatte günstigere Eigenschaften – von Achard biostatistisch belegt – als die bis dahin angebaute langblättrige Tabakpflanze. Seine Pionierleistung für die Begründung der biologischen Statistik ist dabei entstanden, als er seine empirischen Feststellungen durch statistische Berechnungen unterlegt hat. Bei diesen Arbeiten hat er mit einer beachtlichen Denkleistung die Aufbereitung von Versuchsergebnissen über klimatische Pflanzenadaptation in etwa 23.000 Dreisatzrechnungen innerhalb von 9 Tagen bewältigt. Die Erfolge seiner Arbeiten haben jedenfalls Friedrich II. sehr zufriedengestellt, denn er gewährte ihm für seine Verdienste um die Verbesserung der inländischen Tabakkultur eine jährliche Pension von immerhin 500 Talern, wengleich die Fermentierung der Tabakblätter wenig erfolgreich war.

Ein Projekt, das Achard fast zehn Jahre in Anspruch nahm, war die Untersuchung färbender Pflanzen. Angeregt hatte es Friedrich II. 1783 während einer Unterredung mit Achard in Sanssouci, indem der König über die Nützlichkeit der Chemie für die Fabrikation und Manufakturen gesprochen habe. Daraufhin hatte er am 3. Januar 1786 an das Direktorium der Akademie geschrieben: „Ich habe ein sehr umfassendes Werk in Angriff genommen, das sehr nützlich werden kann. Es besteht in der Untersuchung der die Farben betreffenden Teile in allen Pflanzen vom Baum bis zu den Kräutern, die wild oder kultiviert in den Staaten des Königs wachsen, um sich des Nutzens zu versichern, den man daraus für die Färberei ziehen kann“. Achard wollte mit diesen Untersuchungen, wie er bekannte, dem Vaterland nützlich werden, deshalb bewog es ihn „zu einem an schwerer und mit unermesslicher Arbeit

verknüpften Unternehmen“. Er hat 2.500 Pflanzenstoffe untersucht und insgesamt 594.000 Experimente durchgeführt. Dieses Unternehmen hat ihn manches bürokratische und finanzielle Ungemach beschert, aber auch eine gewisse Anerkennung. Denn auf Anraten des Generaldirektoriums und mit Unterstützung der Akademie hielt Achard zwei Jahre lang Vorlesungen über die Färberei vor Färbern, Druckern und Gerbern, in denen Achard sie mit wichtigen Neuerungen, Feinheiten und Erkenntnissen der Farbe und des Färbens vertraut machte.

Zu den Aufgaben, die an Achard vom König oder vom Generaldirektorium herangetragen wurden, gehörten Gutachten über Bleiweiß, insbesondere über seine Verfälschungen, über die Anlegung einer Produktionsstätte für Brillen und optische Instrumente in Neuruppin, die Untersuchung der Glasproduktion in Neustadt an der Dosse, um die Leitfähigkeit des Glases und die Brechung der Lichtstrahlen zu prüfen und die Überwachung der Versuche über die Verschiedenheit der Gläser zu übernehmen, eine Aufgabe, die aus dem wissenschaftlichen Instrumentenbau erwuchs. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass Achard sich intensiv optischen Forschungen hingab. So brachte er im September 1790 dreizehn Nächte hintereinander im Laboratorium zu, um optische Experimente durchzuführen, wie der Augenzeuge Dieudonné Thiébaud, selbst Mitglied der Akademie der Berliner Akademie der Wissenschaften, zu berichten wusste. Vom selben Augenzeugen hören wir, dass er gesehen habe, „wie er viele geschickt erdachte und sowohl präzise arbeitende wie auch nützliche Maschinen der Akademie vorgestellt hatte. Monsieur Achard hat viel erreicht, weil er ebenso Ausdauer wie Eifer besitzt und weil er sich mit diesen Vorzügen der Wissenschaft widmet“.

All seine chemischen und physikalischen Versuche und Untersuchungen, seine öffentlichen Vorlesungen hat Achard 1791 in seinen im Selbstverlag veröffentlichten „Vorlesungen über die Experimentalphysik“ zusammengefasst. Die „Vorlesungen“ zeugen von der Belesenheit des Verfassers bzw. von seiner Kenntnis naturwissenschaftlicher Versuche, Entdeckungen, Entwicklungen und Veröffentlichungen im Aus- und Inland, und man kann sie als eine Art Bilanz naturwissenschaftlicher Forschung ein knappes Jahrzehnt vor der Wende zum 19. Jahrhundert, als ein naturwissenschaftliches Handbuch betrachten, in dem auch ethische Auffassungen Achards zur Wissenschaft verstreut eingeflochten sind. Ausführlich werden die von ihm angestellten Versuche beschrieben, weil sie als „sinnliche Vorstellungen der Wahrheit der vorgetragenen Sätze zu ihrer Erläuterung und Aufklärung viel beitragen, über dem die Kunst, Versuche anzustellen, einen der wichtigsten Teile der Elemen-

tarphysik ausmacht“. Bei dem „Vortrage der Theorien und Meinungen verschiedener Naturforscher habe ich Parteilichkeit und Lieblingsmeinungen ganz beiseite gesetzt und es meinen Zuhörern überlassen, unter diesen oft sämtlichen unverdaulichen Speisen die ihren Verdauungsorganen angemessensten zu wählen“. Achard bekannte aber auch, dass es dem echten Gelehrten in so manchen Fällen besser anstehen würde, das „Ich weiß es nicht“ auszusprechen als sich den neuesten, oft unausgereiften, sogar „romanhaften“ Erklärungen gewisser Träger der Wissenschaft anzuschließen und daraufhin schon „große Sprünge“ zu machen, bevor „die Beine schon die nötige Stärke“ haben. Und der Lehrer sollte den Mut haben einzugestehen, dass er dieses und oder jenes nicht zu deuten vermöge, und er stellt fest, dass zwar manche neuere Anschauungen glaubhaft, ja wahrscheinlich seien, nicht aber bewiesen sind, weshalb man beim Unterricht vorerst besser tue, an den älteren und bisher bewährten festzuhalten. Daher glaubt Achard selbst zwar schon 1780, dass Wärme nach Eulers Lehre eine „Bewegung“ sei, dass der „berühmte Lehrsatz von der Erhaltung der Kräfte gelte, die nicht verloren gehen können“, und erkennt auch zahlreiche Ergebnisse der neueren Chemie als vielversprechende, bedeutsame und öffnende Entwicklungswege an, wie z. B. die zusammengesetzte Natur des Wassers, aber er lehrte sie 1791 noch nicht, weil sie nach seiner Meinung zwar „sehr wahrscheinlich“ sind, jedoch des „gründlichen Beweises“ immer noch erst bedürfen.

Achard erörtert die Eigenschaften der Materie, die Bewegung, Schwere, Reibung, Verbindung und Verwandlung von festen und flüssigen Körpern im wesentlich in der ihnen von Isaak Newton erteilten Fassung und getreu dem Grundsatz, dass „eine Veränderung nur durch eine zureichende Ursache bewirkt werden kann“, und „wo keine Ursache ist, auch keine Wirkung erfolgen kann“. Zugleich lässt er den Leser wissen, dass wir nicht nur, wie schon Newton, z. B. von der Attraktionskraft kaum Kenntnis besitzen und „es weit besser ist, geradezu herauszusagen, dass wir von der Ursache der Affinität, Adhäsion, Schwere usw. gar nichts wissen“. Wir erkennen zwar, dass Kräfte tätig sind, aber nicht wie und warum.

Wenn Achard auf die Affinität, auf die Verbindungsfähigkeit chemischer Elemente, zu sprechen kommt, attackiert er „oft betrügerische Alchimisten“, die sich Versuche bedienen, „unwissende leichtgläubige Leute zu hintergehen und Ihnen glauben zu machen, dass sie die, nur in ihren hirnlosen Köpfen existierende, doch ihren Beuteln so heilsame Tinktur erfunden, welche die Verwandlung und Veredelung der Metalle hervorbringen soll; wie leicht ist es auch einen bloß sehenden, nicht denkenden Kopf auf diese Art zu überzeu-

gen, dass man Kupfer in Silber und Eisen in Kupfer oder wohl gar in Gold verwandeln könne“.

Begeht sich Achard auf das Gebiet der Chemie, begegnet er uns als Anhänger der Phlogistontheorie, vertritt jedoch die Lehren der neu entdeckten Luftarten, insbesondere die „dephlogistierte“, die sauerstoffhaltige Luft, wie sie Priestley und Scheele entdeckten und beschrieben. Ihre „Erkenntnis hat zur Erklärung vieler Erscheinungen in der Natur“ beigetragen, „besonders hat man durch solche erst die atmosphärische Luft recht kennen gelernt“. Je mehr die atmosphärische Luft Sauerstoff enthält, „desto geschickter ist sie zum Atemholen und zur Unterhaltung des Feuers“ und „zur Verbrennung großer Hitze“.

Die Beispiele aus den gedruckten und voluminösen „Vorlesungen“, ein für seine Zeit höchst anerkennendes Werk, zeigen uns Achard in seiner Liebe zur Sache, Freiheit vor Vorurteilen, Schärfe der Beobachtung und des Urteils, unbedingter Wahrheitsliebe, Achtung vor den Tatsachen, den Ergebnissen der Versuche und Erfahrungen, dagegen Misstrauen gegenüber zweifelhaften Hypothesen und Theorien „ohne genügendes Fundamentum“. Mag Achard bei seinen Forschungen auch manchen Versuch unternommen haben, der von den Zeitgenossen belächelt oder abfällig beurteilt wurde, wie etwa Kanonenkugeln statt des Schießpulvers mit brennbarer Luft abzuschießen, Schießpulver ohne Salpeter zu bereiten, Hühnereier mittels Elektrizität auszubrüten oder Edelsteine künstlich herzustellen, mag mitunter seine reiche und starke Phantasie stets auf neue, mitunter gewagte Wege geführt haben, so bestätigten aber seine zahlreichen Versuche in den „Vorlesungen“, „den genievollen, oft verkannten Physiker“, wie ihn Humboldt charakterisierte, sind sie Beispiele seines „Talents im Ersinnen von Experimenten“.

Die Ehrungen blieben nicht aus. Ohne die Mitgliedschaft in einer auswärtigen Akademie oder wissenschaftlichen Gesellschaft im 18. Jahrhundert zu hoch bewerten zu wollen, ist es doch erstaunlich, dass Achard Mitglied von 29 Akademien bzw. Gesellschaften war, unter anderem der Leopoldina, der Bayerischen oder Königlichen Schwedischen Akademie der Wissenschaften, was zugleich auch auf einen lebhaften Informationsfluss zwischen verschiedenen, damals in Europa maßgebenden Naturforschern und wissenschaftlichen Institutionen hinweist.

Von 1787 bis 1796 war Achard auch verantwortlich für den meteorologischen Dienst an der Akademie. Er nahm regelmäßige meteorologische Messungen vor und trug seine Beobachtungen auf den Akademiesitzungen

vor und beschrieb oder demonstrierte Barometer, Hygrometer, Regenschirm, Anemometer und „atmosphärische Elektrizitätsmesser“.

Die Vielfalt der chemischen und physikalischen Forschungen Achards führte ihn auch auf Wege, die wir mit dem Begriff „Abenteuer“ kennzeichnen können. Als 1783 die Brüder Montgolfier einen Heißluftballon in die Lüfte aufsteigen ließen, und damit das Zeitalter der Luftfahrt eingeläutet wurde, reizten die französischen Erfolge auch Achard. Als Attraktion hatte er im Oktober 1783 im Berliner Lustgarten bei Anwesenheit des preußischen Hofes einen mit Wasserstoff gefüllten Ballon, eine Charliere, aufsteigen lassen, wobei ihm seine Versuche mit dem Kautschuk zu Gute kamen, indem er die innere Ballonhülle mit „elastischem Harz“ imprägnierte. Weitere unbemannte Ballonflüge sollten folgen. Doch ein missglückter Versuch brachte Achard beim Berliner Publikum Spott und Verdruss ein.

1794 wartete Achard mit dem ersten transportablen optischen Feldtelegraphen in Preußen auf, zu dem er einen deutschen und französischen Telegraphen-Code anfertigte. In Anwesenheit Friedrich Wilhelms II. demonstrierte Achard zwischen Spandau und Schloss Bellevue in Berlin die Funktionsfähigkeit des Telegraphen. Mit seinem Telegraphen-Code konnte er mit 661 Nummern zur deutschen und 2.394 Nummern zur französischen Sprache 23.750 Wörter oder Sätze andeuten. Friedrich Wilhelm II., der sich vom Erfolg dieser Versuche überzeugt zeigte, ließ Achard eine Gratifikation von 500 Talern zukommen.

Im letzten Jahrzehnt des 18. Jahrhunderts deutet sich bei Achard eine Richtungsänderung in der Forschung an, die am 15. Juli 1798 in einem Schreiben an die Akademieleitung ihren prägnanten Ausdruck findet: „Die Applikation der Chemie und der Physik auf die Ökonomie ist der Zweig, dem ich mich besonders widme“, wobei Ökonomie damals im allgemeinen Landwirtschaft meinte. Wenig vorher hatte Achard dem jungen König Friedrich Wilhelm III. wissen lassen, „dass es mein heißester Wunsch ist, durch meine Arbeit gemeinnützig zu werden“. Wir beobachten jedenfalls eine stärkere Hinwendung zu bodenkundlichen, botanischen, pflanzenbaulichen und landwirtschaftlichen Fragen, wobei seine früheren mineralischen Arbeiten, die Untersuchungen der verschiedenen „Erden“ und ihrer Verbindungen fast zwangsläufig eine Brücke zur Bodenkunde schlugen. Ferner haben wir zu berücksichtigen, dass Achard inzwischen auch Gutsbesitzer in Kaulsdorf (1782–1785), später in Französisch Buchholz (1790/92–1800/01) geworden war. Er beschäftigt sich mit der Zusammensetzung der Böden, schrieb über den Einfluss des Lichtes auf die Farben der Pflanzen, berichtete über die so-

genannte Verglasung der Humuserde in der Ackerkrume, über die Wirkung der Salze auf die Erde, über den Einfluss der Elektrizität auf das Wachstum der Pflanzen und ähnliche Themen. Auf den Akademiesitzungen hielt er Vorträge über die Auswirkungen von Kälte und Wärme auf die Vegetation und über die chemische Beeinflussung des Keimens des Korns.

1790 verfasste Achard einen Beitrag „Über die Ernährung der Pflanze und Veränderungen, die verschiedene Substanzen während des Wachstums erfahren“. Einleitend heißt es: „Innerhalb der Physik scheinen mir keine Forschungsarbeiten von größerem Interesse zu sein als solche, die dazu beitragen, die Ernährung der Pflanzen oder die auf diese ausgeübte Wirkung verschiedener Stoffe aufzuklären – entweder um die Vegetation in ihrem Wachstum zu fördern oder auch diese zu hemmen, wobei das letztere heißen soll: Pflanzen in einer ähnlichen Weise zu beeinflussen, wie dies mit Giften gegenüber Lebewesen aus dem Tierreich geschehen kann. Das Thema, das ich in dieser Mitteilung behandeln möchte, schließt die folgenden vier Fragen ein: 1. Welche Stoffe dienen der Ernährung? 2. Dienen die gleichen Stoffe allen Pflanzen als Nährstoff oder bedarf jede Pflanze entsprechend ihrer Grundzusammensetzung besonderer Nährstoffe? 3. Unter welchen Bedingungen dienen die Nährstoffe der Pflanze tatsächlich ihrer Ernährung? 4. Auf welche Weise setzen die Pflanzen die Stoffe um, die ihnen als Nahrung dienen und sie zu Wachstum und Entwicklung befähigen?“

Viele seiner Annahmen, besonders über die Pflanzenernährung und die Substanzbildung durch Pflanzen, haben sich nicht bestätigt, wohl aber weisen die meisten der Wissenschaftsfragen, die er sich auf diesem Gebiet selbst gestellt hat, nicht selten direkt zu der Erklärung der mineralischen Pflanzenernährung durch Liebig. Es bleibt jedenfalls festzuhalten, dass Achard schon lange vor Carl Philipp Sprengel und ein halbes Jahrhundert vor Justus von Liebig bahnbrechende Arbeiten über die mineralische Düngung und Vegetationsversuche mit Mineralsalzen angestellt hat.

Verdienstvoll sind auch seine Untersuchungen über den Ölgehalt verschiedener Pflanzensamen, Möglichkeiten der Ertragssteigerung von Grünland durch exakte und wiederholbare Fütterungsversuche mit Milchvieh zu werten, ein Thema, das anderen Chemikern von 200 Jahren keinerlei Beachtung wert war. Er verglich z. B. das englische Raygras, in Deutschland unter dem Namen Deutsches Weidelgras bekannt, zur Verbesserung des Wiesenbaues, mit dem Futterwert von Rotklee und Luzerne und unterschied dabei sehr genau zwischen der Wirkung auf die Milchmenge der Versuchstiere und auf die Milchqualität, um später seine gewonnenen Erkenntnisse in zwei Bro-

schüren unter die Landwirte zu bringen. Nach Achards Ansicht erhöhte das englische Raygras nicht nur die Milchmenge und den Fettgehalt der Milch, sondern verbesserte auch die Butterqualität.

Es wäre auch zu erwähnen, dass unter dem Direktorat von Achard die Physikalische Klasse der Akademie auch etliche Preisfragen, die damals eine außerordentlich große Rolle im Wissenschaftsleben und in der Wissenschaftsorganisation spielten, zu landwirtschaftlichen Fragen ausgeschrieben wurden, wie etwa Preisfragen über den Futterkräuterbau, Koppelwirtschaft, Stallfütterung, Unkraut, Grundstoffe in den erdigen Bestandteilen, welche erdigen Bestandteile man mit Hilfe der chemischen Zersetzung in den Getreidearten findet, über die Gewinnung von einheimischen Ölen oder den Milzbrand beim Hornvieh. Unter fortschrittlichen Landwirten war Achard kein Unbekannter. Schon 1783 schrieb ein Landwirt, vermutlich ein Gutsbesitzer aus Brandenburg, in einer an die Akademie der Wissenschaften eingereichten Preisschrift zu der Preisfrage über den vorteilhaften Gebrauch der Futterkräuter, „dass die Lehre von der Fruchtbarkeit der Erde überhaupt noch lange nicht gehörig bearbeitet ist ... Die Chemie allein kann uns hier eine Fackel anzünden, diese Dunkelheit aufzuhellen ... Hier entsteht bei mir aus der Fülle meines Herzens dieser lebhafteste Wunsch, dass doch unsere jetzigen großen Scheidekünstler, z. B. ein Achard, ein Gerhard, diese Newtons unter den gelehrten Chymisten, diesen Gegenstand ihrer Bemühungen (für) wert achten möchten“.

Nachdem Achard „mit Genauigkeit den Nutzen des Anbaues der verschiedenen Getreidearten, Futterkräuter, Ölgewächse und Farbpflanzen“ auf seinem Gut in Französisch Buchholz geprüft hatte, bot er dem König und dem Generaldirektorium 1798 an, praktische Landwirte über seine Forschungen, gewonnenen Erkenntnisse und praktischen Erfahrungen zu unterrichten, was bei König und Verwaltung auf großes Entgegenkommen stieß. In seiner Begründung für den Unterrichtsplan verweist Achard darauf, dass ein „bloß theoretischer Unterricht“ nicht allein zur Verbreitung gemeinnütziger ökonomischer Kenntnisse und Meliorationen führen kann“, sondern es anschaulicher Erkenntnis und praktischer Beobachtung bedarf, um dann zu betonen: „Es ist fast keine Wissenschaft, in welcher die Praxis mit der Theorie so unzertrennlich verbunden werden muss als die Ökonomie, insofern nämlich nicht bloß ein brillantes, sondern ein solides Gebäude errichten werden soll“.

Als Chemiker und Physiker sowie Direktor der Physikalischen Klasse der Preußischen Akademie der Wissenschaften war der „berühmte Achard“, wie

er oft genannt wurde, in den letzten zwei Jahrzehnten vor 1800 hoch geschätzt. Auf dem Höhepunkt seiner wissenschaftlichen Karriere wendet er sich nun einem Gebiet zu, das ihn bis an sein Lebensende nicht mehr los lassen wird und das ihm Anerkennung, aber auch Ärger, Sorgen und Schulden bereiten wird. Am 11. Januar 1799 wandte sich Achard an den preußischen König Friedrich Wilhelm III. und teilte ihm mit, dass er in der Lage sei, aus Runkelrüben Zucker zu gewinnen. Der Mitteilung lag eine Abhandlung mit dem Titel „Über die Bereitung des Zuckers aus der Runkelrübe“ bei. In zwanzig Paragraphen erläuterte Achard die Kultivierung der Rüben und beschrieb seine Technologie zur Rübenzuckerproduktion. Durch die Fabrikation des Runkelrübenzuckers entstehe ein neuer Erwerbszweig, wodurch der Wohlstand der Bevölkerung und die Staatseinnahmen vermehrt würden.

Was der König in die Hand bekam, war die Quintessenz seiner Forschungen, die in Kaulsdorf und Französisch Buchholz begonnen und im Akademielaboratorium in Berlin, in der Dorotheenstraße 10, fortgesetzt wurden. Es war die Geburtsurkunde der Rübenzuckerindustrie. Achard widmete sich nunmehr einer Tätigkeit, die ohne seine akademische Arbeit, ohne seine naturwissenschaftliche Forschung nicht denkbar gewesen wäre. Er wandelt sich zu einem „Rübenbauer und Zuckerfabrikant“, dessen Wirken ihm überzeitliche Bedeutung gibt.

Achard hatte die 1747 von Marggraf gemachte Entdeckung der Saccharose in den Rüben aufgegriffen, die, wie er an Friedrich Wilhelm III. schrieb, „im Lande und außer dem Lande 52 Jahre geschlafen“ hat, und er richtete nun seine Bemühungen darauf, möglicherweise angeregt durch seine Tabakversuche, eine möglichst zuckerreiche Rübe zu finden. Er untersuchte und selektierte 22 Rübenspezies und begann mit dem Anbau sowie der Auswahl der verschiedenen Betarüben und ihrer Verwertung zur Zuckergewinnung. Während seiner Anbauversuche gelang er zu der Überzeugung, dass „unter den vielen Pflanzen ... die Runkelrübe meinem Zweck am besten entsprach“. Er verglich Runkelrüben aus verschiedenen deutschen Landesteilen, nahm eine chemische Analyse der Runkelrüben hinsichtlich ihres Anteils an Wasser, Gummosum, kristallisationsfähigem Zucker, Schleimzucker, Stärkemehl, Eiweiß, Farbstoff, Ammoniaksalze, Salpeter und verschiedener anderer Neutralsalze vor und gewann die Überzeugung, „dass Rüben mit weißem Fleisch und weißer Rinde, sowie die mit gelber Rinde und weißem oder gelblichem Fleisch die allervorzüglichsten zur Zuckerfabrikation sind, weil solche den größten Zuckergehalt haben und dabei, wenn sie zweckmäßig kultiviert werden, am wenigsten Schleimteile enthalten“. Als Ausgangsmaterial seiner ziel-

strebigen Selektions- und Anbauversuche benutzte Achard zunehmend die Magdeburgischen und Halberstädtischen Runkelrüben, die spindelförmig ohne Seitenwurzeln waren und etwa 8 Prozent Zucker enthielten, wenngleich in der praktischen Landwirtschaft dieser Zuckergehalt nicht erreicht wurde, er betrug höchstens 5 bis 6 Prozent. Sie wurden aber die Stammrüben der sogenannten schlesischen Rübe und damit schlechthin der heutigen Zuckerrübe.

Die Eingabe Achards und beigelegte Rüben- und Zuckerproben riefen bei Friedrich Wilhelm III. „landesväterliche Freude“ über den „unschätzbaren Wert“ dieser „Erfindung“ hervor, sie „verspricht dem Staat einen so großen und wesentlichen Nutzen“. Seit je ist Zucker ein Steuerobjekt des Staates, das reiche Steuereinnahmen verspricht, und aus diesem Grunde finden Achards Bemühungen das königliche Interesse. Der König versprach Achard eine „außerordentliche Belohnung“ in Gestalt eines Gutes im Werte von etwa 100.000 Talern, wenn im „Großen anzustellende Versuche“ sich bewähren, lehnte jedoch das von Achard geforderte „Privilegium exclusivum“ auf zehn Jahre für die inländische Zuckerfabrikation ab, weil er und die Regierung einen Ruin der Rohzuckerraffinerien befürchteten. Die preußische Ministerialbürokratie war überhaupt gegen die Gewinnung des Zuckers aus Runkelrüben, sie unterstützte vielmehr den Vorschlag des Chemikers Hermbstaedt, aus dem Saft von Ahornbäumen, wie in Kanada und der USA, Zucker zu erzeugen, wie aber auch Neider, Missgünstige, Verleumder die Achardsche Rübenzuckererzeugung bekämpfen, selbst bekannte Wissenschaftler wie Albrecht Thaer oder Johann Beckmann hielten nichts von der Rübenzuckerproduktion. Thaer verstieg sich sogar soweit, dass er Achard einen Scharlatan nannte.

Das Generaldirektorium ordnete unter den Augen einer Kommission Großversuche an, in der Achard den Beweis antreten sollte, dass sich seine „Erfindung“ erfolgreich ökonomisch verwerten lasse. Zu diesem Zweck ließ Achard das chemische Labor der Akademie in eine „königliche Rohzuckerfabrik“ umbauen, was den Protest mancher bekannter Akademiemitglieder herausforderte. Die technisch-ökonomische Umsetzung kostete jedoch weit mehr Geld, als Achard aufbringen konnte. Hier zeigte sich seine Schwäche: er war ein ausgezeichneter Experimentator, aber ein schlechter Betriebswirt, aber auch die Wissenschaft warf Probleme auf. Achard musste eingestehen: „Die Bahn, die ich auf einem noch ganz unbekanntem Feld ebnen musste, wurde besonders dadurch sehr schwierig, dass die Erfolge der im Kleinen auf dem chemischen Untersuchungswege gemachten Arbeiten so sehr von den Resultaten abwichen, die ... im Großen ausgeführte Arbeiten gewähren“. So bereitete die Trennung der Schleimteile vom Rohzucker immer wieder

Schwierigkeiten, zuerst versuchte es Achard mit Ochsenblut und Kalk, später mit Schwefelsäure, die dann in Frankreich bis etwa 1840 benutzt wurde, jedoch von der Prüfungskommission sehr skeptisch beurteilt wurde. Die Schwierigkeiten, die bei den Versuchen auftraten, fasste der Leiter der Kommission, Gerhard, in die Worte. Es ist „eine ausgemachte Sache, dass die inländische Zuckerfabrikation noch völlig in ihrer Kindheit ist“, wenn man bedenkt, dass die Zuckerproduktion nur von „Chymisten“, denen die „praktischen Handgriffe der Zuckersiederei unbekannt sind, vorgenommen wurde“.

Während die Großversuche im Akademielabor noch liefen, veröffentlichte Achard im April 1799 „aus heißer Liebe für mein Preußisches Vaterland“ die Abhandlung „Ausführliche Beschreibung der Methode, nach welcher bei der Kultur der Runkelrüben verfahren werden muss“, die er bereits als Grundlage eines „neuen Zweiges Europäischer Industrie“ betrachtete. In prägnanter Form fasste er all die Maßnahmen zusammen, die auch heute noch die Rübenbauern beherzigen, und in der er zum ersten Male den Begriff „Rübenzucker“ gebrauchte. Achard hatte in dieser Schrift auch die Bedeutung von Zuckergehalt und Nichtzuckerstoffen erkannt, wenn er schreibt, dass bei der Kultur der Runkelrübe verfahren werden muss, „um ihren Zuckerstoff nach Möglichkeit zu vermehren, damit die Runkelrübe zuckerreicher und ärmer an anderen (Bestand)teilen, welche die Ausscheidung des Zuckerstoffs im Wege stehen“, ist. Hier und auch später betonte er immer wieder, dass es auf die von ihm beschriebene besondere Kultur der Rüben ankomme, um Rüben mit hohem Zuckergehalt zu erhalten, was seine Gegner bestritten. Achards Leistungen auf dem Gebiet eines Runkelrübenanbaues speziell zur Zuckererzeugung sind größer, als vielfach angenommen. Seine analytische Beobachtungsgabe im Pflanzenbau war bemerkenswert, die Widerstände gegen eine verwendungsspezifische Anbauempfehlung waren erheblich. Es gab wenig Einsicht in die Aussaat- und Düngungsempfehlungen. Die Unwissenheit um den vegetativen Zuckerspeicherungsprozess in der Rübe war groß. Bei dem vielfachen Futtermangel war es schwierig, die Landwirte davon zu überzeugen, die für eine Zuckererzeugung bestimmten Runkelrüben nicht abzublatten.

Obwohl die Zuckerkommission bestätigen musste, dass die Großversuche positiv verlaufen seien und auch die Abfallprodukte sowohl zur Essigfabrikation, als auch zur Sirup- und Branntweingewinnung und in der Viehmast sinnvoll verwandt werden könnten, zögerte der preußische König mit seinem Versprechen einer außergewöhnlichen Belohnung, denn er habe in den Protokollen keine überzeugende Rentabilität erkennen können. Achard erwarb

darauflin 1801 ein Gut in Kunern in Niederschlesien, um hier den Rübenbau und die Rübenzuckerfabrikation in Gang zu setzen. Die Inbetriebnahme und Entwicklung der Fabrik vollzog sich unter großen Wirren und Hoffnungen. Die Fabrik befand sich fortgesetzt im Umbau und im Versuchsstadium. Achard sah nur die technische Aufgabe und nicht die wirtschaftliche Forderung, er beherrschte nicht die „*économie en détail*“, wie ihm wohlwollende Kritiker bescheinigten. Dennoch hat er sich in Kunern als Technologe der Rübenzuckerfabrikation verdient gemacht, bei der Verarbeitung der Rüben und Organisation des Fabrikbetriebes Neuland erschlossen und den Weg gewiesen. Es war auch sein Verdienst, dass sein Freund Moritz von Kopyy in Krain zeitweise eine ökonomisch rentable Zuckerfabrik betrieb, die nach der Achardschen Technologie arbeitete. Als Napoleon im November 1806 die Kontinentalsperre verfügte, die eine erneute Teuerung des Rohrzuckers zur Folge hatte, konnte Achard die sich daraus ergebenden günstigen Bedingungen leider nicht wahrnehmen, denn im März 1807 brannte seine Fabrik in Kunern vollständig ab, ein Schicksalsschlag, der seine Existenz in Frage stellte. Achard erwog sogar, nach Russland auszuwandern. Doch er blieb ein unermüdlicher Propagandist seiner Sache im In- und Ausland. 1809 erschien sein Buch „Die europäische Zuckerfabrikation aus Runkelrüben“, das er mit entsprechendem Begleitschreiben an die verschiedensten Fürstenhöfe im In- und Ausland sandte, um auf die europäische Bedeutung der Rübenzuckerfabrikation aufmerksam zu machen. Dieses Buch gilt gemeinhin als Standardwerk in der Zuckerfabrikation. Es ist das Ergebnis langjähriger theoretischer und praktischer Erfahrungen sowie die Darstellung miteinander verbundener Teilgebiete, wie der angewandten Botanik, des Acker- und Pflanzenbaues, der Zuckerfabrikation, der Gärungstechnik und der landwirtschaftlichen Ökonomie unter dem übergeordneten Gesichtspunkt einer gewünschten Verflechtung von agrarischer Produktion mit einem industriellen Gewerbe.

Die Idee Achards, Rübenzucker zu erzeugen, fand im In- und Ausland reges Interesse, Unternehmer, Gutsbesitzer und Apotheker griffen sie auf und begannen mit der Produktion. Zuvor hatten Wissenschaftler wie Götting in Jena, Lampadius in Freiberg in Sachsen und selbst die Französische Akademie die Erkenntnisse von Achard zur Zuckergewinnung aus Rüben bestätigt.

1810 richtete Achard auf seinem Gut eine Lehranstalt ein, die auch von ausländischen Interessenten besucht wurde. Mit dem Sturz Napoleons und der Aufhebung der Kontinentalsperre, unter der die Rübenzuckerfabrikation einen Aufschwung erlebte, wurde das Lebenswerk von Achard schwer erschüttert. Preiswerter englischer Rohrzucker überschwemmte nun wieder den

europäischen Markt, und Achard stellte aus gesundheitlichen und vor allem aus wirtschaftlichen Gründen seinen Lehrbetrieb ein.

Das Leben Achards als Wissenschaftler, als Chemiker und Physiker, als Gutsbesitzer, Rübenbauer und Zuckerfabrikant wäre unvollständig, wenn wir nicht auch einen Blick auf seine Schuldenverhältnisse werfen. Schulden durchziehen fast sein ganzes Berufsleben, bestimmen seine Arbeitsgebiete und beflügeln seine Betriebsamkeit. Achard hatte schon frühzeitig, 1777, bei einer Gehaltsforderung gegenüber Friedrich II. erklärt, dass seine Studien einen beträchtlichen Aufwand erfordern, wozu seine geringen Mittel nicht ausreichten. Und die Akademiedirektoren bestätigten dem König, dass Achard weder Mühe noch Kosten scheue, um seine Forschungen zu betreiben. Er verausgabte mehr, als sein Gehalt betrug und geriet damit zunehmend in finanzielle Bedrängnisse und Schwierigkeiten.

Er war eine naturwissenschaftliche Begabung, aber besaß in finanziellen Dingen eine unrealistische Veranlagung. Er war Wissenschaftler und Experimentator, aber kein Unternehmer. Im Auftrag des Königs und des Generaldirektoriums forschte und arbeitete er auf eigenes Risiko, dem er nicht gewachsen war. Viele der Achardschen Forschungs- und Experimentierprojekte wären niemals entstanden, wenn er nicht auf eigene Initiative und damit auf eigenes Risiko gehandelt hätte. Einzelne seiner Projekte wären im Vorfeld bereits an den finanziellen Entscheidungsträgern im Generaldirektorium gescheitert, wenn Achard eine Vorfinanzierung gefordert hätte, weil man seine Projekte mangels chemischer und technischer Kenntnisse nicht verstanden hätte. Deshalb neigte Achard dazu, vollendete Tatsachen zu schaffen, um so mit argumentativer Überzeugungskraft und in der Hoffnung auf seine Projekterfolge den König und seine engsten Berater zu überzeugen, zumindest aber zur Nachgiebigkeit zu drängen.

Achard rang immer wieder um die Erstattung von Auslagen für diverse Materialien, für physikalische, chemische und meteorologische Apparaturen, für Löhne seiner Laborgehilfen und sonstiger Arbeitskräfte, deren zögerliche und oft ziemlich späte Begleichung durch die Akademiekasse seine Einkommensverhältnisse belasteten. Als er das Projekt färbender Pflanzen in Angriff nahm, nahm er eine Anleihe von 12.000 Talern auf, „wodurch“, wie er an den König schreibt, „ich gänzlich zugrunde gerichtet, und durch nachherige wucherische Behandlung meiner Gläubiger, von denen ich Indult brauchte, in ein unabsichtliches Verderben gestürzt wurde“. Mit der Hinwendung zur Zuckerfabrikation wurden die finanziellen Probleme und Schulden zu einem Dauerthema. Je drängender sie wurden, desto mehr beschäftigten sie auch die

Akademie, das Generaldirektorium, die schlesische Provinzialregierung und den König. Dabei war Achard ein gutbezahlter, sogar höchstbezahlter Wissenschaftler. Sein Gehalt betrug 1791 2.300 Taler, zehn Jahre sogar 3.700 Taler während Marggraf nur 900 Taler, andere bekannte Akademiemitglieder viel weniger erhielten. Dennoch reichte es für Achard nicht, das Geld ging von den königlichen Kassen in der Regel direkt an seine Gläubiger. Die Konsequenz war, dass er sich immer wieder in Schulden verstrickte. Im Jahre 1802 wurde eine Schuldensumme von etwa 125.000 Talern errechnet, sie könnte noch größer gewesen sein. Man ist versucht zu sagen, dass Schuldenmachen eine Triebfeder seiner Forschungen und Arbeit war. Um die Schulden abzubauen, verpfändete Achard sein Gehalt, musste er wieder und wieder um finanzielle Unterstützung nachsuchen, die ihm immer unwilliger gewährt wurde. Erstaunlich aber, wohl einmalig ist es, dass sich die Akademie, das Generaldirektorium, die schlesische Provinzialregierung und die Könige mehr als zwanzig Jahre um die Schulden Achards kümmerten, was man auch dahin deuten kann, dass sie für Achard soziale Verantwortung trugen und ihn nicht ganz fallen ließen. Das spricht gewiss für seine Bedeutung; die Verwaltung muss sich aber auch bewusst gewesen sein, dass er finanziell überfordert war, und die Ergebnisse seiner Rüben- und Zuckerversuche für Preußen von großem Wert waren.

1810 erhält Achard endlich die vom König versprochene Belohnung. Aber erhält mit der Löschung der königlichen Hypothek auf sein Gut nur ein Drittel der vom König verheißenen Belohnung. Der Staat übernahm nur einen Teil der Entwicklungskosten der Rübenzuckerfabrikation, die mit dem Anbau und der Selektion zuckerreicher Rüben begonnen hatten, sowie beim Kauf des Gutes Kunern, dem Bau der Fabrikationsanlagen, der Entwicklung der Verfahren zur Rübenverarbeitung und Zuckerproduktion entstanden waren, die Achard ausgelegt hatte, und die seinen großen Schuldenberg bildeten.

Franz Carl Achard starb am 21. April 1821 in Kunern, heute Konary, arm und vergessen.

Ein Leben endete, in dem sich Größe und Tragik vereinten. Rübenanbau und Zuckergewinnung waren seit der Jahrhundertwende sein Lebensziel. Dafür hat er gekämpft, gestritten und gelitten. Nicht ein einziges Mal hat er trotz aller finanziellen, technologischen und persönlichen Schwierigkeiten seine Idee aufgegeben, seinen Zielen blieb er bis zu seinem Tode treu. Er begriff sich stets als Patriot, der aus „heißer Liebe für das preußische Vaterland“ einen neuen Gewerbebranchen errichten wollte. Achard war besessen von seiner Idee, er war temperamentvoll, beharrlich, ein sanguinisches Temperament,

das sich nicht vertrug mit der gewissenhaften Gründlichkeit oder oft auch Langsamkeit der vom preußischen König eingesetzten Kommission. Dabei war er angewiesen auf Friedrich Wilhelm III., denn ohne die, manchmal auch unwillig gewährten finanziellen Hilfen, wäre Achard nicht der „Vater der Rübenzuckerindustrie“ geworden. Achard betrat Neuland, er war phantasie-reich, und mit seinen Initiativen stand er im Gegensatz zu Verwaltung und Bürokratie. Seiner Phantasie entsprang gewiss auch seine schöpferische Kraft und Leistung, jedoch bot sie auch Angriffsflächen, und er musste sich deshalb allzu oft mit seinen Kritikern, Gegnern und Feinden auseinandersetzen.

Ohne Optimismus, der seine kaufmännischen und wirtschaftlichen Überlegungen beflügelte, hätte er die technologischen und bürokratischen Schwierigkeiten nicht überwinden können. Er war ein rastloser und umtriebiger Wissenschaftler, Chemiker und Physiker. Seine wissenschaftliche Produktivität war außergewöhnlich. Achard publizierte über 240 wissenschaftliche Arbeiten, wovon 60 Publikationen das Thema Rübenzucker behandelten. Aber er war kein Unternehmer. Als Akademiemitglied war er ein Staatsbeamter und unterlag damit bestimmten Regeln und Gesetzen, die seinem Handlungsspielraum gewisse Grenzen setzten. Er lebte bescheiden, verausgabte sein Gehalt und Einkommen für die Forschung. Im Vertrauen auf die versprochene königliche Belohnung lieb er Geld, machte große Schulden für die Verwirklichung seiner Idee und konnte sich bis an sein Lebensende nie von den Schulden befreien.

Nach dem Sturze Napoleons und der Aufhebung der Kontinental Sperre, nach dem Tode Achards waren die Rübenzuckerindustrie für einige Jahrzehnte nahezu verschwunden. In Frankreich jedoch, durch die Subventionspolitik des französischen Staates und durch entscheidende Verbesserungen, blühte dieser Industriezweig allmählich auf. Seit 1840 war der Siegeszug der Rübenzuckerproduktion dann auch in Deutschland nicht mehr aufzuhalten. Um 1900 verarbeiteten in Deutschland 401 Rübenzuckerfabriken mehr als 12,5 Millionen Tonnen Rüben auf Zucker. Die deutsche Rübenzuckerindustrie entwickelte sich zu einer ökonomischen Weltmacht, und ihre Produkte nahmen in der deutschen Exportliste zeitweise den ersten Rang ein. Heute wird weltweit ein Drittel des erzeugten „süßen Salzes“ aus der Zuckerrübe gewonnen. Die Grundlagen für diese Entwicklung schuf Franz Carl Achard durch seine besessene, ideenreiche, beharrliche Forschung, die Höhen und Tiefen erlebte und von Hoffnungen und Enttäuschungen begleitet war.

Die Leibniz-Sozietät wie auch die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften haben allen Anlass, Franz Carl Achard, dessen Geburts-

tag sich am 28. April 2003 zum 250. Mal jährte, zu gedenken und sein wissenschaftliches und ökonomisch-technologisches Erbe zu bewahren.

Lothar Michalowsky

## **Alternative weichmagnetische Werkstoffentwicklungen**

Wissenschaftliche Mitteilung, vorgetragen in der Klasse Naturwissenschaften am 15.1.2004.

### **1. Einführende Bemerkungen**

Die internationalen Veranstaltungen zu den weichmagnetischen Materialien in den letzten Jahren haben deutlich gezeigt, dass das Potenzial der weichmagnetischen Werkstoffe noch beträchtlich ist, und weitere Werkstoffverbesserungen und insbesondere Bauelementeoptimierungen erwartet werden können. Vielversprechende Ansätze bieten vor allem neue Verfahren in der Technologie der Ferritherstellung, insbesondere in der Pulverpräparation unter Nutzung chemischer und auch physikalischer Reaktionen, die auf folgende Ziele konzentriert werden:

- Reduzierung der Primärkorngrößen in den Bereich  $< 200$  nm
- 6-8-Komponentensysteme
- Sicherstellung der chemischen Homogenität bezüglich der Zusammensetzung
- Nanokomposite mit Glasphasen zur Isolierung der Korngrenzen
- Einlagerungskomponenten zur Verbesserung der mechanischen und thermischen Eigenschaften
- Neue Werkstoffe für die Leistungsübertragung und Entstörung im Temperatur-Bereich bis  $250^{\circ}\text{C}$  und darüber.

Vor der industriellen Umsetzung stehen auch neue Technologien, wie die

- Tandemsinterung zur Realisierung kurzer Aufheizzeiten, beispielsweise in der Kombination Elektro- und Gasbeheizung
- das Cofiring von Ni-Zn-Ferriten mit Unedelmetallpasten zur Herstellung induktiver Verdrahtungsträger für Hybridschaltungen
- die Weiterentwicklung von Multilayerverfahren zur Herstellung von Chipinduktivitäten und integrierten Transformatoren
- die Nutzung der Dünnschichttechnologien zur Herstellung integrierter Induktivitäten für Chipkarten und die Mikrosystemtechnik, zur Fertigung integrierter passiver Schaltungsträger (R-, C-, L-Integration) sowie für hybridintegrierte RF- Identifikationssysteme

- weichmagnetische Kompositwerkstoffe mit hoher Sättigungspolarisation als Energiespeicherwerkstoffe, hoher Permeabilität für Übertragerwerkstoffe und für sehr hohe Anwendungsfrequenzen als Absorbermaterialien
- amorphe und nanokristalline Werkstoffe mit sehr hoher Permeabilität bzw. hoher Sättigungspolarisation für Anwendungen in der Kommunikationstechnik und in der Übertragung hoher Leistungen in Verbindung mit der Verfügbarkeit der Leistungselektronik.

Bei weichmagnetischen Werkstoffen wird der Entwicklungstrend zur evolutionären Eigenschaftsverbesserung anhalten. Innovative Entwicklungen sind zu erwarten durch:

- die Anwendung der physikalischen Technologien zur Oberflächenbehandlung (Laserritzen, Laserwärmebehandlung, Beschichtung) bei Elektroblechen hinsichtlich der Senkung der Kernverluste
- Gefüge-Eigenschaftsoptimierungen, insbesondere über das Korngrenzenengineering
- die Verfügbarkeit nanokristalliner Werkstoffe
- planare Magnetstrukturen auf ferrimagnetischen und isolierenden Substraten
- Werkstoffe mit extremem Magnetowiderstand
- innere Oxidation nanokristalliner weichmagnetischer Werkstoffe
- neue Magnetwerkstoffe und Supraleiter für die Leistungselektronik
- Übertragerwerkstoffe für die Leistungsübertragung im Frequenzbereich bis 10 MHz
- multifunktionale Werkstoffe, Multilayer-Ferrit-Induktivitäten
- Alunit-Co-Komposite für die Nanoskalierung.

Die Fortschritte der Werkstoffwissenschaft bei der Nutzung neuer physikalischer Wirkprinzipien führen über neue leistungsfähigere Materialien zu völlig neuen bzw. verbesserten Ansätzen für den Geräte- und Anlagenbau in der Elektrotechnik und Elektronik. Im Folgenden sollen dazu einige ausgewählte Entwicklungsgebiete vorgestellt und erkannte Anwendungen beschrieben werden. Die neuen Werkstoffe tangieren sowohl ausgewählte Eigenschaften als auch Herstellungsverfahren. Sie betreffen u.a.:

- weichmagnetische Verbundwerkstoffe mit organischer und anorganisch-nichtmetallischer Bindung
- amorphe und nanokristalline metallische weichmagnetische Werkstoffe
- keramische Supraleiterwerkstoffe mit hoher Sprungtemperatur
- oxidische und metallische Werkstoffe mit hohem Magnetowiderstand.

Die strategische Bedeutung dieser neuen Werkstoffe wird in folgenden Anwendungen gesehen:

- Abschirmung elektromagnetischer Felder, Absorption elektromagnetischer Wellen bis in den GHz-Bereich, Kurzschluss magnetischer Streufelder, Speicherdrosseln, Linearübertrager
- Hochleistungsantriebe mit verbessertem Wirkungsgrad, verlustarme und -freie Energieübertragungssysteme, Sensorik
- Induktive Bauelemente für die Leistungselektronik
- Magnetoresistive Feldmesstechnik in der Sensorik, Dichtspeichertechnik, Spintransistoren.

Im Folgenden wird ein Überblick zum Stand der Werkstoffentwicklungen zu Kompositwerkstoffen und zu amorphen und nanokristallinen Werkstoffen sowie zu deren wichtigsten Anwendungen gegeben werden.

## 2. Weichmagnetische Verbundwerkstoffe mit organischer und anorganisch-nichtmetallischer Bindung

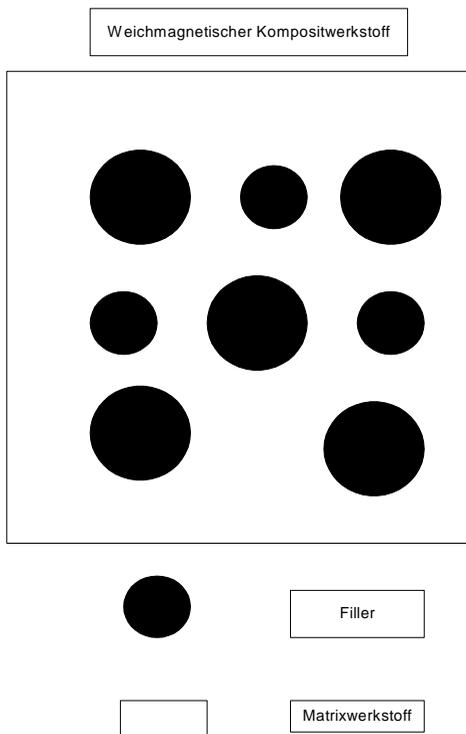


Bild 1: Aufbauschema eines weichmagnetischen Kompositwerkstoffes

Für technische Anwendungen von Bedeutung sind weichmagnetische Pulververbundwerkstoffe mit polymerer oder anorganisch- nichtmetallischer Bindung nach Bild 1. Charakteristisch für den Aufbau dieser Werkstoffe ist eine unmagnetische Matrix, die mit kugelförmigen weichmagnetischen Teilchen gefüllt ist. Die effektive Permeabilität dieser Kompositwerkstoffe ist durch die wirksame Scherung stark reduziert. Sie werden deshalb auch häufig als Werkstoffe mit verteiltem Luftspalt bezeichnet. Für die wirksame Scherung ist das Verhältnis der Werkstoffbestandteile magnetischer Filler/Bindematrix entscheidend. Die Scherung führt zu einer Schrägstellung der Hystereseschleife bei gleichbleibender Koerzitivfeldstärke (siehe Bild 2).

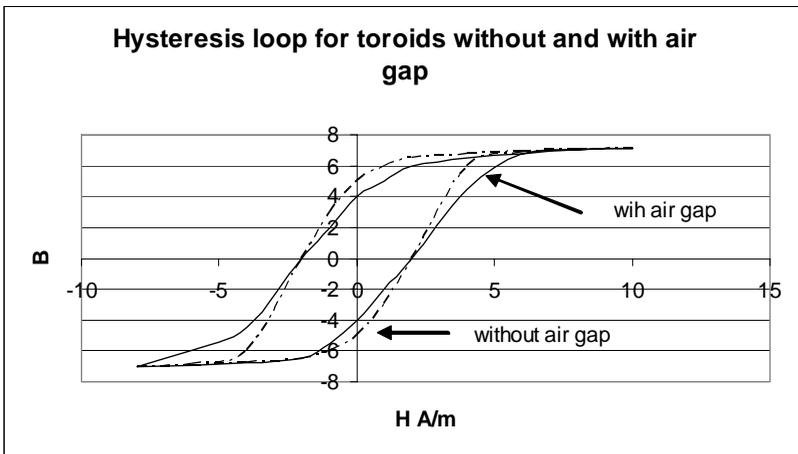


Bild 2: Scherung der Hystereseschleife nach EPCOS Ferrite and Accessories 2001

Allgemein berechnet sich die effektive Permeabilität eines weichmagnetischen Kernes nach der folgenden Gleichung

$$\mu_e = \frac{L}{\mu_0 N} \sum \frac{1}{A}$$

mit

A dem effektiven Querschnitt

l der magnetischen Weglänge

L der Induktivität

N der Windungszahl

$\mu_0$  der Vakuumpermeabilität

Für den Fall der Scherung des Magnetwerkstoffes mit einem Luftspalt der Breite s und der effektiven magnetischen Weglänge  $l_e$  ergibt sich die gescher-

te Permeabilität zu

$$\mu_e = \frac{\mu_i}{1 + \frac{s}{l_e} \mu_i}$$

Werkstoffseitig unterscheidet man bei den weichmagnetischen Kompositen in Abhängigkeit von den Fillerkomponenten folgende Grundtypen:

- Carbonyleisenwerkstoffe
- Reineisenwerkstoffe
- Molybdän-Permalloy-Werkstoffe (MPP)
- Sendust- Werkstoffe (Eisen-Aluminium-Silicium-Basis)
- gebundene amorphe Co-Basis-Legierungen
- gebundene nanokristalline Fe-Basis-Legierungen
- gebundene weichmagnetische Ferrite.

Die Auswahl der Bindertypen erfolgt unter Beachtung der Klassifikationstemperaturen für die Anwendung der Composite, der magnetischen Spezifikation für die jeweilige Applikation und der Kostenstruktur. Übliche Binderwerkstoffe sind

- |                             |                                   |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| • Polymere                  | Klassifikationstemperatur < 250°C |
| • Wassergläser              | Klassifikationstemperatur < 350°C |
| • Silikatgläser und Keramik | Klassifikationstemperatur < 450°C |

Weichmagnetische metallische Bindephasen sind metallurgisch vorstellbar. Erste erfolgreiche Ansätze besitzt das mechanische Auflegieren von Metallschichten durch Mahlen für die Sinter- oder Schweißverdichtung. Dabei aufgebaute Spannungen müssen durch einen thermischen Nachbehandlungsprozess ausgeheilt werden.

Für eine reine Kugelpackung der weichmagnetischen Einlagerungskomponenten ergibt sich eine theoretische Grenze von ca. 80% für den Filleranteil der Verbunde bei Kalandrier- und Spritzgießprozessen. Durch Trockenpressen sind bei reduziertem Binderanteil auch höhere Filleranteile möglich. Die Herstellung der Kernformen erfolgt auf pulvermetallurgischem Wege. Die Technologie beinhaltet folgende Hauptschritte:

- Presspulveraufbereitung unter Zugabe der Binder, der Presshilfsmittel
- Formgebung durch Pressen, Spritzgießen, Extrusion und Kalandrieren
- Härtung im Temperaturbereich zwischen 250 und 450°C.

Interessante Ansätze sind auch über die Anwendung von Dünnschichttechnologien erkennbar, die die Herstellung von metallischen Multilayersystemen ermöglichen. Die Dünnschichttechnologie wird neuen Konzepten für mikrosystemtechnische Multifunktionssensoren zugrundegelegt.

Übliche Bauformen für die weichmagnetischen Kompositwerkstoffe sind:

- Ringkerne
- EE-Kerne
- Schalenkerne
- Zylinder- und Gewindekerne
- Folien und Platten für Abschirm- und Streufeldkompensationslösungen.

Die unterschiedlichen weichmagnetischen Komposite sind durch folgende Eigenschaften zu charakterisieren:

- Weichmagnetische Polymerferrite mit Anfangspermeabilitäten von 6 bis 35 und Flussdichten bis 0,5T, Anwendungsfrequenzen bis 2,5 GHz
- Carbonyleisen mit Anfangspermeabilitäten von 5 bis 60, Flussdichte 1,2-1,6 T, Anwendungsfrequenzen bis 800 MHz
- Reineisen mit Anfangspermeabilitäten von 60 bis 150, Flussdichte 1,6 T, Anwendungsfrequenzen bis 150 kHz
- Ni-Fe (High Flux) mit Anfangspermeabilitäten bis 200, Flussdichte 1,5 T, Anwendungsfrequenzen bis 50 kHz
- Molybdän-Permalloy mit Anfangspermeabilitäten von 70 bis 600, Flussdichte 0,7-1,0 T, Anwendungsfrequenzen bis 300 kHz
- Sendust mit Anfangspermeabilitäten bis 120, Flussdichte 1,2 T, hohe Härte und sehr gute Verschleißfestigkeit in Reibpaarungen, Anwendungsfrequenzen bis 250 kHz
- amorphe und nanokristalline Komposite mit Anfangspermeabilitäten bis 600, Sättigungsflussdichten von 0,6-1,5 T und oberen Anwendungsfrequenzen bis 300 kHz
- Kobalt50 / Eisen50 mit einer Sättigungsflussdichte von 2,4 T

(Siehe auch Bilder 3-6)

Das System Kobalt- Eisen ist momentan nur im Frequenzbereich unterhalb 10 kHz in der Anwendung. Oberflächenisolierte feine Teilchen im Korndurchmesserbereich  $< 5 \mu\text{m}$  versprechen interessante Weiterentwicklungen. Von Bedeutung werden auch Auflegierungsverfahren zu Trägern auf Basis Co50/Fe50 sein. Kobalt- Aluminiten mit definierter Nanoporenstruktur im Aluminiumoxidträger, die mit Kobalt gefüllt werden, versprechen neue Lösungen zur Messung von Längen mit einer Ortsauflösung im Nanometerbereich.



Bild 3: Anfangspermeabilität unterschiedlicher Kompositwerkstoffe

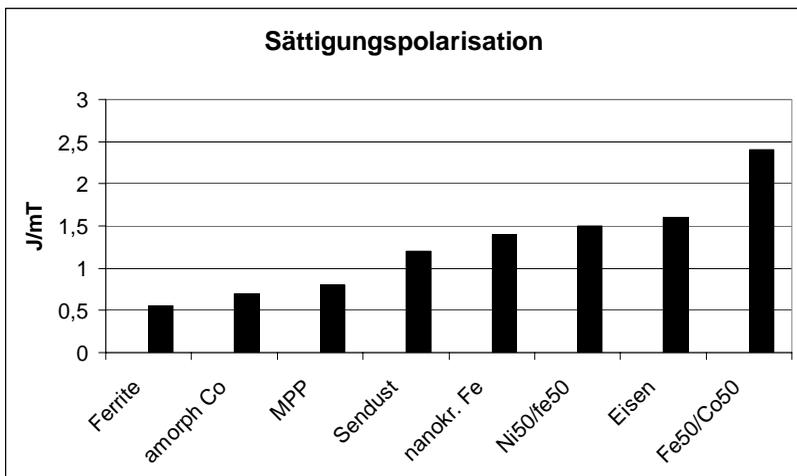


Bild 4: Sättigungspolarisation weichmagnetischer Werkstoffe

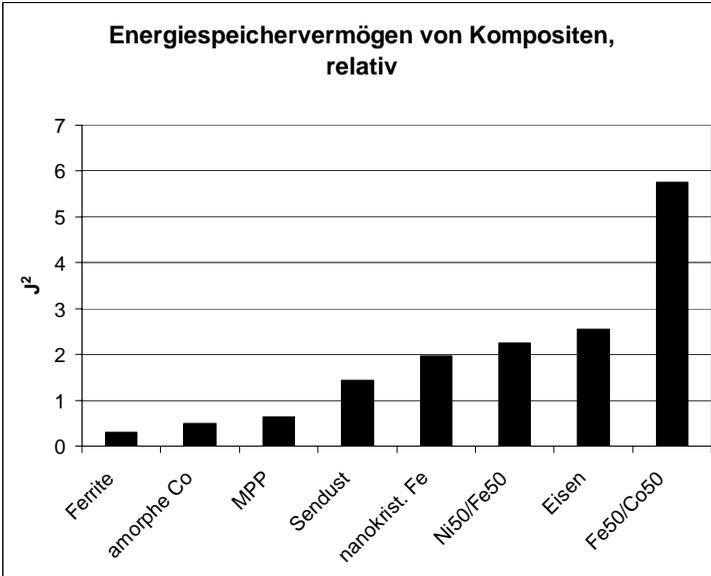


Bild 5 : Quadrat der Sättigungspolarisation für unterschiedliche Kompositwerkstoffe für die Anwendung in Speicherdrosseln

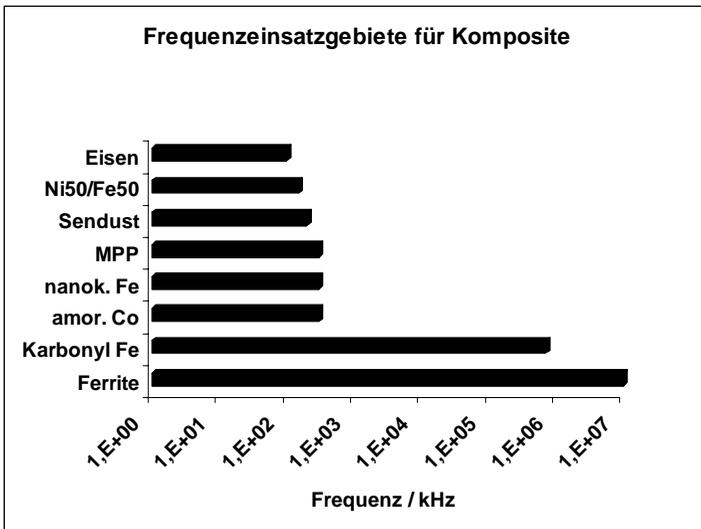


Bild 6: Frequenzeinsatzbereiche für weichmagnetische Kompositwerkstoffe

Eine umfassende Charakterisierung der kommerziellen weichmagnetischen Ferrit-Polymer-Werkstoffeigenschaften beinhaltet die Tabelle 1.

Bevorzugte Applikation			Injection molded parts	films	
Material			Ferrite P C	Ferrite Polymer Composite	
Bezeichnung			C302	C350	C351
	Symbol	Unit			
initial permeability, 1MHz	$\mu_i$		17±20%	9±20%	9±20%
Flux density H=25kA/m, 10kHz	$B_s(25^\circ\text{C})$	mT	330	255	255
Remanent induction H=25kA/m, 10kHz	$B_r(25^\circ\text{C})$	mT	15	9	9
Coercivity H=25kA/m, 10kHz	$H_c(25^\circ\text{C})$	A/M	770	600	600
Relative loss factor f= 1MHz f= 100 MHz f= 1GHz	$\tan\delta/\mu_i$		< 0,0004 < 0,03	< 0,005 < 0,400	< 0,005 < 0,400
Hysteresis material constant	$\eta_B$	$10^{-3}/\text{mT}$	< 0,25	< 2	< 2
Temperature coefficient	$\alpha$	1/K	< 0,0002	< $5 \cdot 10^{-5}$	< $5 \cdot 10^{-5}$
Density	Y	Kg/m <sup>3</sup>	3500	2930	2930
Resistivity f= 1 kHz f= 10 kHz f= 10 MHz	$\rho$	O		500 21 100	500 100 100
Relative Permittivity f= 1 kHz f= 10 kHz f= 10 MHz	$\epsilon_p$			700 280 100	700 21 21
Max. oper. Temp.	$T_{\max}$	°C	180	120	120

Dielectric strength	$E_D$	KV/mm		1	0,8
Tensile strength	$\sigma_Z$	N/mm <sup>2</sup>		1,5	2,5
Compressibility	$\kappa$	N/mm <sup>2</sup>		70	70

Tab. 1: Ferrite Polymer Composite nach EPCOS- Datenbuch 2001

Anwendungsschwerpunkte für Kompositwerkstoffe:

- Drosseln für die Entstörung hochfrequenter elektromagnetischer Störspannungen bzw. -ströme sowie Großsignalanwendungen
- Speicherdrosseln (das Energiespeichervermögen  $E$  ist dem Quadrat der magnetischen Flussdichte  $B$  proportional, das heißt normiert bei Polymerferrit  $E=1$  und für Co50-Fe50  $E=23!$  Siehe auch Bild 5) besonders für Anwendungen in Schaltnetzteilen
- Sendust für verschleißfeste Magnetköpfe, Drosseln
- Polymerfolien für Abschirmzwecke
- Carbonyleisenwerkstoffe für Gewinde- und Zylinderkerne zur Abstimmung von Oszillatorschaltungen
- Kurzschluss von Streufeldern in gescherten Bauformen von Ferriten

### 3. Höchstpermeable amorphe und nanokristalline Werkstoffe

Diesen Werkstoffen ist in den Modellansätzen gemeinsam, dass hohe Permeabilitäten zu verbinden sind mit

- einer hohen Sättigungspolarisation
- sehr geringen Beiträgen zur Freien Energie, d.h.  
 $K_1 \rightarrow 0, \quad \lambda \rightarrow 0$  und
- dichten Werkstoffen definierter Korngröße und Korngrenzen bezüglich Zusammensetzung und Struktur.

Bild 7 beinhaltet die wichtigsten hochpermeablen Werkstoffsysteme im Vergleich bezüglich der Permeabilität und Sättigungsinduktion, das allerdings keine Information zu möglichen Anwendungsfrequenzen beinhaltet.

In Bild 8 ist der Zusammenhang zwischen Korngröße und Koerzitivfeldstärke für den Phasenübergang amorph-nanokristallin-mikrokristallin dargestellt. Im Bereich der Korngröße von  $< 30$  nm bricht die Koerzitivfeldstärke drastisch zu sehr kleinen Werten zusammen.

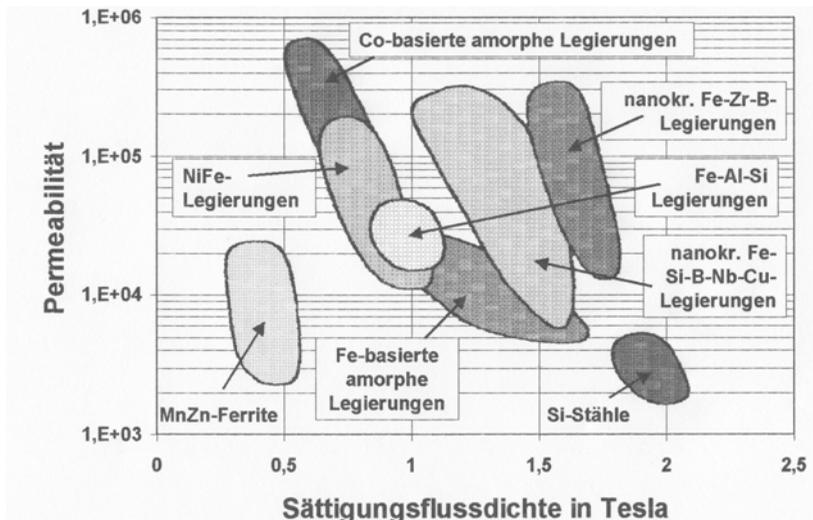


Bild 7: Permeabilitäts-Sättigungsinduktions-Diagramm weichm. Werkstoffe

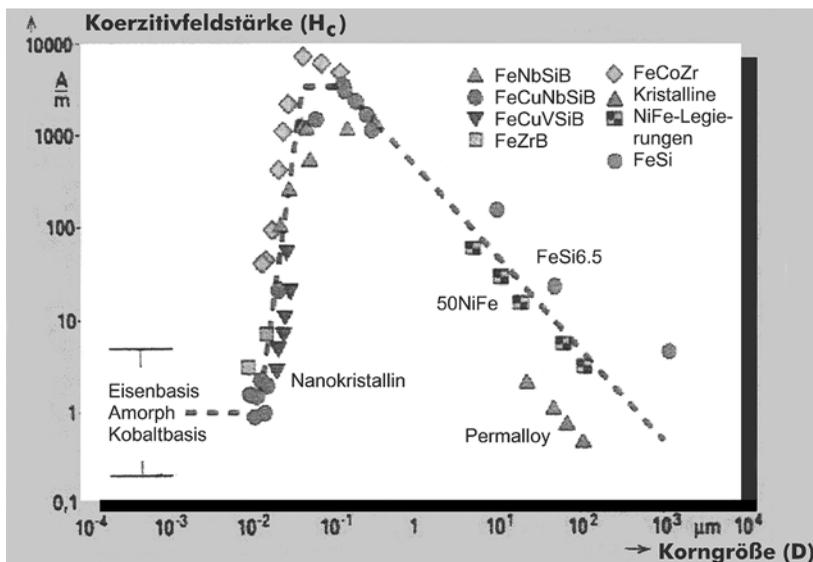


Bild 8: Übergang vom amorphen in den nanokristallinen Zustand, Änderung der Koerzitivfeldstärke in Abhängigkeit von der Korngröße

Werkstoffsysteme mit sehr geringer Kristallanisotropieenergie und Magnetostriktion beinhaltet die Tabelle 2.

Werkstoff	Struktur	erreichte Permeabilität
Fe <sub>76..81</sub> (Si, B, C) <sub>19..24</sub>	amorph	300000
Fe <sub>40</sub> Ni <sub>40</sub> (Si, B, C) <sub>20</sub>	amorph	250000
(CoFe) <sub>70</sub> (MoSiB) <sub>30</sub>	amorph	600000
Fe <sub>76..73</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> (Si, B) <sub>20..23</sub>	nanokristallin	100000
Fe <sub>19</sub> Ni <sub>81</sub>	kristallin	400000
Fe <sub>84,9</sub> Si <sub>9,5</sub> Al <sub>5,6</sub>	kristallin	30000
MnZn-Ferrit	kristallin	20000

Tab. 2: Werkstoffe mit sehr kleiner Kristallanisotropieenergie und Magnetostriktion

Koerzitivkraftmodelle sind in der Literatur vielfältig diskutiert worden. Bei weichmagnetischen Werkstoffen geht der Magnetisierungsprozess in der Regel von Blochwandverschiebungen oder Keimwachstum aus. Für diesen Umagnetisierungsvorgang können signifikante Eigenschaften der Koerzitivfeldstärke, wie deren Temperaturabhängigkeit und Abhängigkeit von der Mikrostruktur hinreichend erklärt werden. Aus energetischen Betrachtungen lässt sich die Beziehung für die Koerzitivfeldstärke  $H_c$

$$H_c \approx \frac{E_k + E_f + E_{\sigma} + E_f + a}{J_s} \cdot f(\text{Gefüge})$$

ableiten, die für qualitative Eigenschaftsabschätzungen in vielen Fällen ausreichend ist. Sättigungsflussdichte und Magnetostriktion und auch die uniaxiale induzierte Anisotropieenergie sind über die chemische Zusammensetzung steuerbar. Die Tabelle 3 beinhaltet Werkstoffzusammensetzungen mit definierter chemischer Zusammensetzung.

Werkstoffe mit sehr kleiner Koerzitivfeldstärke erfordern in Übereinstimmung mit den Modellen für eine hohe Anfangspermeabilität

$$\mu_i - 1 \propto \frac{J_s^2}{K_1 + E_{\sigma} + E_u + \dots}$$

- hohe Sättigungspolarisationen
- verschwindende Freie Energie
- dichte grobkörnige Mikrostrukturen
- oder dichte Festkörper mit amorpher oder nanokristalliner Struktur.

Für Anwendungen bei höheren Frequenzen sind zu ergänzen

- Korngrenzen- oder Bandisolation
- kleine elektrische Leitfähigkeit
- geringe Kernverluste

Zusammensetzung	Sättigungsflussdichte	Magnetostriktion
At%	T	$10^{-6}$
Vitrovac 7 Fe(SiB) <sub>15-25</sub> + Co,Ni,Cr	1,4-1,6	25-40
Vitrovac 6 Co(Fe,Mn) <sub>5</sub> (Si,B) <sub>20-30</sub> <sup>+</sup> Mo, Ni, Nb	0,4-1,2	0.01-1,0
Vitroperm FeCu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub> (Si,B) <sub>20-24</sub>	1,1-1,3	0,1-1,0

Tab. 3: Beispiele für amorph/nanokristalline Werkstoffe mit definierter Sättigungsflussdichte und Magnetostriktion (Vacuumschmelze GmbH & Co. KG)

Für Filteranwendungen sind zusätzliche Anforderungen an die Werkstoffe:

- kleinste Desakkommodation der Anfangspermeabilität  $D < 10^{-6}$
- sehr kleine Temperaturkoeffizienten der Anfangspermeabilität  $\alpha_F < 10^{-6}/K$
- geringe Hysteresebeiwerte  $\eta_B < 0,5 \cdot 10^{-6}/mT$  (Begrenzung der Oberwellenanteile, heute aktuell für die Auslegung von x-DSL Schnittstellen)

Nachstehend werden einige Graphiken nach einer Zusammenstellung von J. Petzold (Vortragsmanuskript zur Weiterbildungsveranstaltung „Magnetwerkstoffe für technische Anwendungen“, Haus der Technik Essen, 2002) zu den Eigenschaften Sättigungspolarisation und Sättigungsmagnetostriktion (Bild 9), Temperatur- und Konzentrationsabhängigkeit der induzierten Anisotropieenergie für  $(Fe_{1-x}Co_x)Si_{10}B_{13}$  ( $Fe_{1-x}Ni_x$ ) $B_{20}$  (Bild 10) abgebildet.

Die Sättigungspolarisation und die Curietemperatur verringern sich etwa proportional zu dem Gehalt an Glasbildnern. Die Kristallisationstemperatur erhöht sich bei den technisch interessanten Werkstoffen von ca. 400 °C auf 500°C bei der Erhöhung des Glasbildneranteils von 15 auf 25 Atom %. Insbesondere die letztere Eigenschafts-Steuerung ist für die Stabilisierung des amorphen Zustandes von Bedeutung.

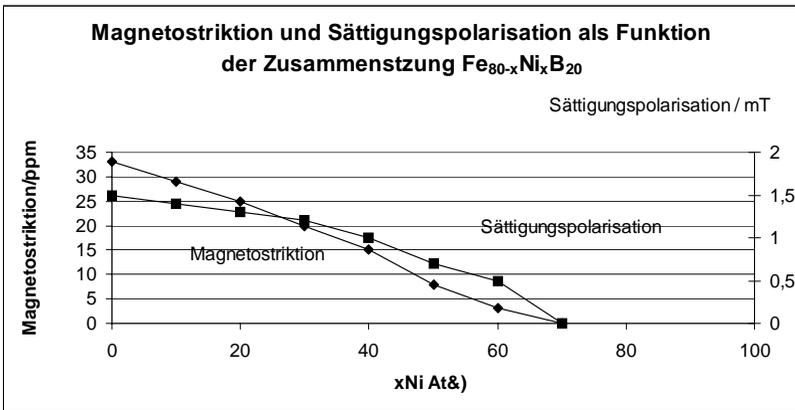
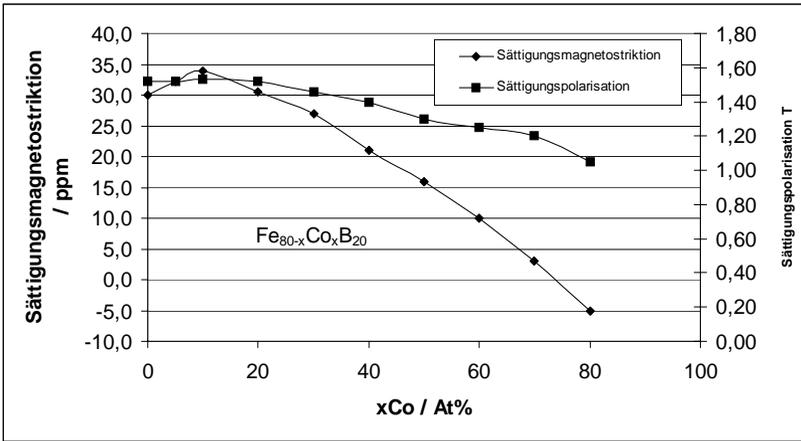


Bild 9 : Abhängigkeit der Sättigungspolarisation und Sättigungsmagnetostraktion von der Zusammensetzung.

Das Bild 9 zeigt, dass über die chemische Zusammensetzung Werkstoffe mit der Magnetostraktion  $\lambda_s = 0$  bei gleichzeitig hoher Sättigungspolarisation eingestellt werden können.

Die induzierte Anisotropieenergie ist ebenfalls stark konzentrations- und temperaturabhängig. Entscheidend für die Amplitude der induzierten Anisotropieenergie ist der Gehalt an den ferromagnetischen Metallen wie Eisen, Kobalt und Nickel (siehe Bild 10).

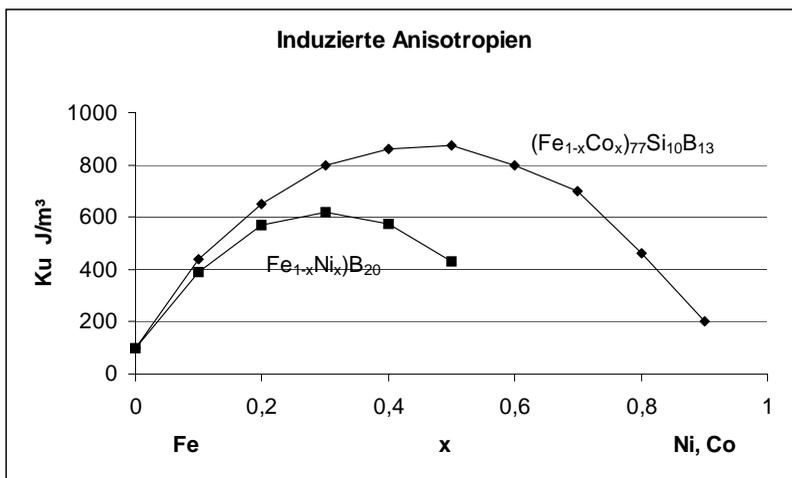
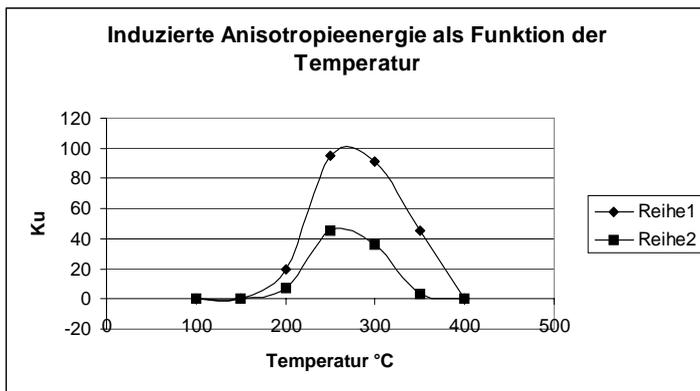


Bild 10 : Temperatur- und Konzentrationsabhängigkeit der induzierten Anisotropieenergie für Legierungen des Typs  $(Fe_{1-x}Co_x)Si_{10}B_{13}$   $(Fe_{1-x}Ni_x)B_{20}$

Experimentell ist die Einstellung der Schleifenform einfach realisierbar. Bei Ringkern-geometrien erzeugt man das Magnetfeld über einen Strom durch einen Leiter, der durch den Ringkern geführt wird. Magnetisierungsrichtung und Magnetfeldrichtung während der Temperung stimmen überein, so dass der Magnetisierungsprozess durch wenige 180°-Wände erfolgt und damit die rechteckige Hystereseschleife beobachtet wird. Zur Einstellung der F-Schleife genügt ein magnetisches Querfeld ausreichender Größe während der Tem-

perung. Bild 11 zeigt die Entstehung der Z- und F-Schleife durch eine Magnetfeldtemperatur:

- Z-Schleife Vorzugsrichtung eingeprägt über  $K_u$  parallel zum Magnetfeld
- F-Schleife Vorzugsrichtung eingeprägt über  $K_u$  senkrecht zum Magnetfeld

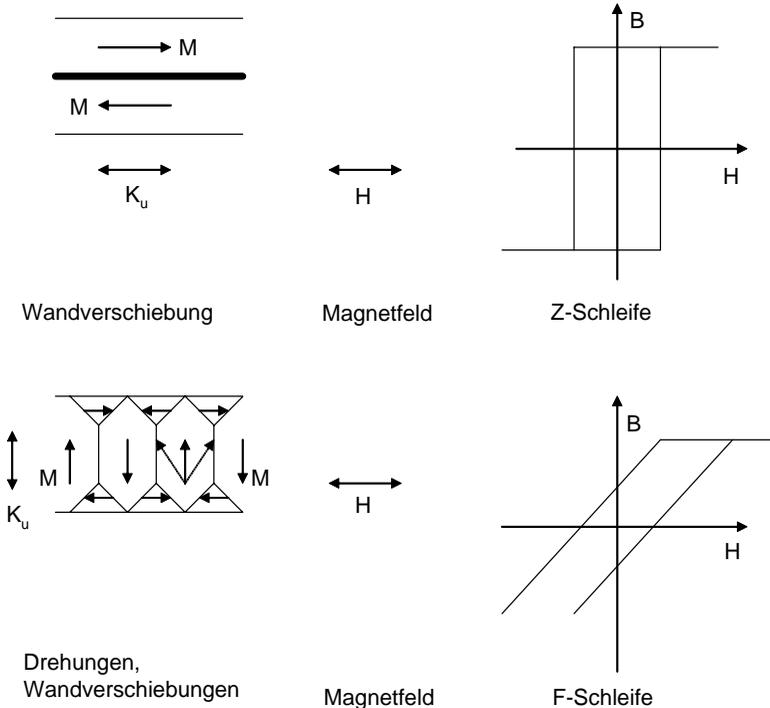


Bild 11: Einfluss der Magnetfeldtemperatur auf die Form der Hystereseschleife in Abhängigkeit von der Feldrichtung  $H$  beim Tempern

Auch bei den amorphen und nanokristallinen Werkstoffen für die Hochfrequenz-leistungsübertragung findet man die bekannte Frequenzabhängigkeit der Hysterese-, Wirbelstrom- und Restverluste für weichmagnetische Werkstoffe bestätigt.

### Erreichter Entwicklungsstand :

- hochpermeabel: Permeabilitäten bis 600.000 sind realisierbar. Für die Anwendung relevant ist jedoch die Frequenzabhängigkeit der Anfangsper-

meabilität, die derzeit bei 20 bis 30 kHz begrenzt ist,

- Leistungsmaterial: Anfangspermeabilitäten von 3000 bis 20000, Kernverluste bei 30kHz von ca. 1W/kg (Bild 12 ).

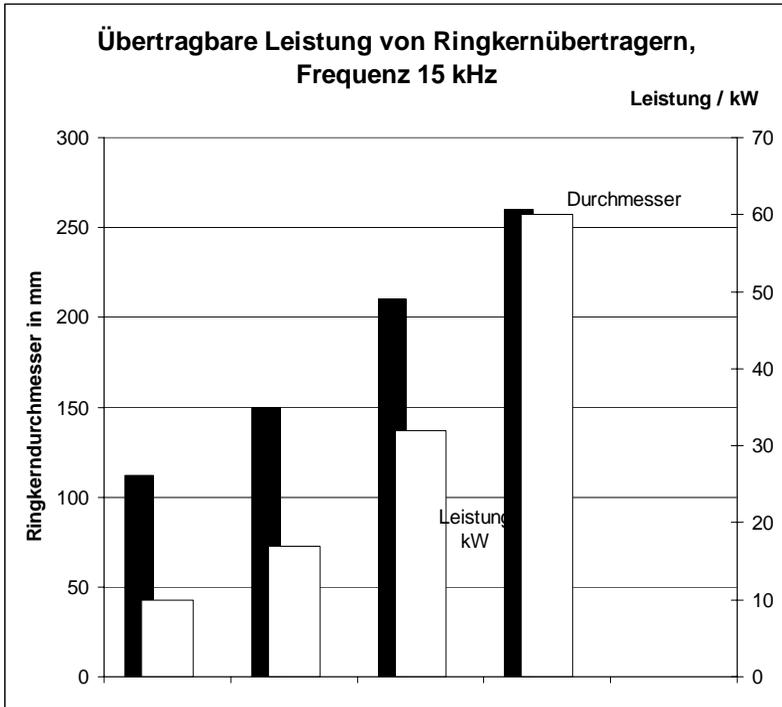


Bild 12: Ringkerndurchmesser und übertragbare Leistung für Ringkernübertrager auf Basis nanokristalliner Werkstoffe

### Potenzial für die Weiterentwicklung

Für den Fall, dass die Widerstandserhöhung für die Bindephease reproduzierbar unter Fertigungsbedingungen erreichbar ist, werden hochpermeable Werkstoffe mit einer Anfangspermeabilität von  $> 1.000.000$  und einer Frequenzstabilität bis 1 MHz sehr bald möglich.

## Applikation

Hauptrichtungen der Anwendung für derzeit industriell verfügbare Werkstoffe sind:

- Transduktordrosseln (Transduktorregler) in Schaltnetzteilen
- Leistungsübertrager bis 500kW Verluste (siehe nach Bild 13)
- Stromkompensierte Funkentstördrosseln (Bild 14)
- Kerne für Impulsübertrager
- Signalübertrager
- Abschirmungen
- Filterdrosseln
- Präzisionsstromwandler für Stromzähler
- Fehlerstromschutzschalter
- Schnittstellenübertrager und stromkompensierte Drosseln für die digitale Übertragungstechnik
- Induktivitäten für die x-DSL-Schnittstellen

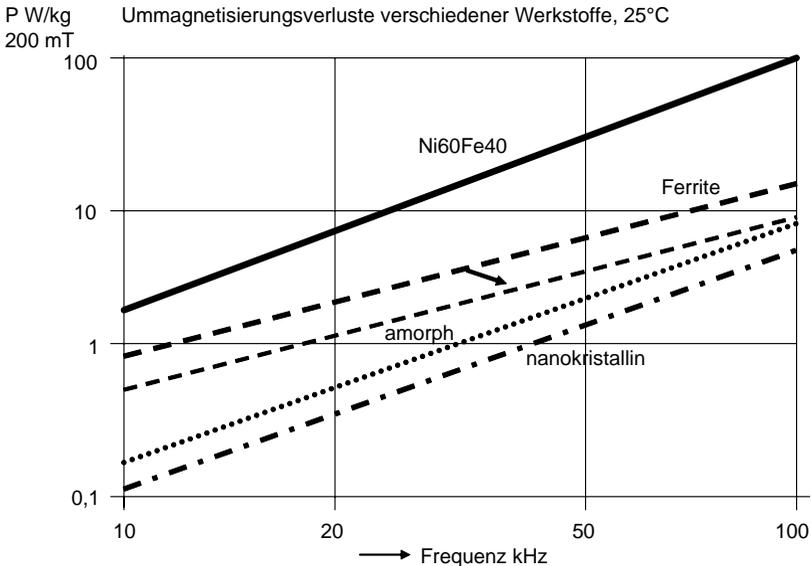


Bild 13: Ummagnetisierungsverluste weichmagnetischer Werkstoffe

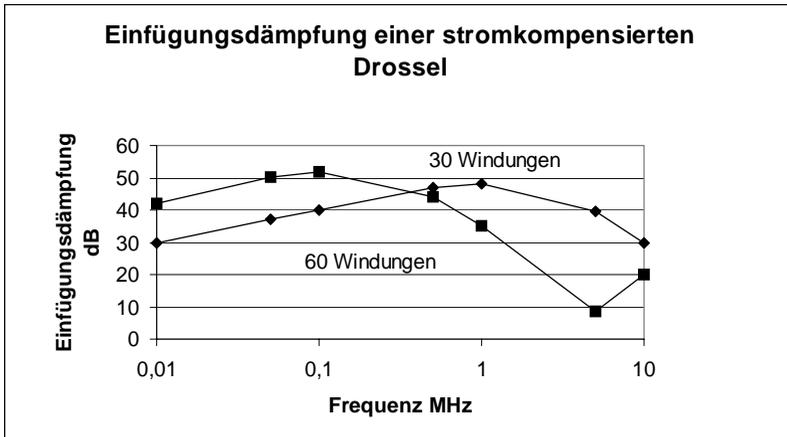


Bild 14: Einfügungsdämpfung einer stromkompensierten Drossel auf Basis nanokristalliner Werkstoffe nach Dokumentation der Vakuumschmelze

### Literatur:

- F.E. Luborsky „Amorphous Metallic Alloys“, Butterworth (1983)
- K. Moorjani, J.M.D. Coey „Magnetic Glasses“ Elsevier (1984)
- S. Steeb, H. Warlimont, „Proc. On the fifth Int. Conf. On rapidly quenched Metals“, Würzburg 1984, North-Holland (1984)
- K.H.J. Buschow e. a. „Encyclopedia of Materials: Science and Technology“, Elsevier, (2001)
- G. Herzer, „Nanocrystalline soft magnetic Alloys“, Handbook of magnetic Materials, Vol. 10, 415–462, ed. By K.H. J. Bushow, Elsevier (1997)
- L. Michalowsky, „Magnettechnik, Grundlagen und Anwendung“, Fachbuch-Verlag Leipzig-Köln, (1993)
- G. Herzer, IEEE Trans. Magn. MAG-25 3327 (1987)
- G. Herzer, IEEE Trans. Magn. MAG-26 1397 (1990)
- J. J. Petzold, Vakuumschmelze GmbH & Co. KG, Hanau CT, Vortrag in der Reihe „Magnetwerkstoffe für technische Anwendungen“, „Amorphe und nanokristalline Werkstoffe“, 21./22.02.02 im Haus der Technik Essen
- R. Boll, „Weichmagnetische Werkstoffe“, Siemens Aktiengesellschaft (1990)
- Datenbuch der Vakuumschmelze GmbH & Co. KG, (2000)
- Vitroperm 500F, VITROVAC 6025Z, Technische Informationsschrift PK-004, Vakuumschmelze GmbH & Co. KG, (1995)
- Vitroperm 500F, VITROVAC 6030F, „Ringbandkerne in Leistungsübertragern“, Technische Informationsschrift PK-003, Vakuumschmelze GmbH & Co. KG, (1998)

- Firmenbroschüre Samco Shanghai Zhi-Gao Amorphous Metals CO., Ltd (2002),  
Werkstoffe und Anwendungen
- M. Ferch, R. Klinger, H.-J. Pöss, „Vitroperm ermöglicht kompakte EMV-Filter“ in  
EMC Journal 2/98
- Z. C. Lu et al. „Investigation on the magnetostriction of nanocrystalline Fe-(Cu-Nb)-  
Si-B alloys”, Journal of Magnetism and Magnetic materials 140-144 (1995),  
421–422, proceedings of the international conference on magnetism, Warsaw, Po-  
land, 22–26-August 1994

Rolf Löther

## **Zeit und Evolution der Lebewesen**

Überarbeitete Fassung eines Vortrages vor den Arbeitskreisen „Zeitrhythmik“ und „Evolutionsforschung als Rekonstruktion der Vergangenheit“ der Leibniz-Sozietät am 13. November 2003.

Die Erforscher der Erdgeschichte erzählen, dass der Planet Erde etwa 4,6 Milliarden Jahre alt ist und sich seitdem ständig verändert. In den ersten 500 Milliarden Jahren entstanden eine feste äußere Schale, die Lithosphäre (Gesteinshülle), und darüber eine Gashülle, die Atmosphäre, deren Temperatur vor etwa 4 Milliarden Jahren die 100° C-Grenze unterschritt. Mit der Abkühlung der zunächst heißen Erde wurden große Mengen Wasser in Form von Wasserdampf bei magmatischen Prozessen freigesetzt. Der Wasserdampf kondensierte und es entstanden die Urmeere und damit die Hydrosphäre, die Wasserhülle des Planeten. Ein Teil des Wassers könnte auch von dem Meteoritenhagel stammen, der auf die Uerde prasselte. Vor etwa 2,3 Milliarden Jahren hatte sich die Erdoberfläche so weit abgekühlt, dass sich Eis bilden konnte. Vor knapp 4 Milliarden Jahren entstand nach heute vorherrschender Meinung im Ergebnis der chemischen Evolution das Leben, d.h. die ersten Lebewesen, im Meer. Damit begann die Ausbildung der Biosphäre. Durch die Photosynthese betreibenden Lebewesen änderte sich die Zusammensetzung der Atmosphäre grundlegend, sie wurde zur Sauerstoffatmosphäre. Die Lithosphäre aber wurde zum Bereich einstiger Biosphären, zur versteinerten Hinterlassenschaft des voranschreitenden Lebens.<sup>1</sup> In der Zeit des Ordoviziums, das vor etwa 510 Millionen Jahren bis vor etwa 438 Millionen Jahren dauerte, probierten erste Pflanzen und Tiere den Übergang vom Leben im Meer zum Leben auf dem Lande. Im anschließenden Silur-Zeitalter, das etwa 26 Millionen Jahre dauerte, wurde das Festland dauerhaft belebt.

Bei der Evolution des Lebens haben wir es also mit einem seit knapp 4 Milliarden Jahren andauernden Vorgang zu tun.<sup>2</sup> Dieser Vorgang ist der di-

1 Vgl. Andrey V. Lapo: *Traces of Bygone Biospheres*. Moskau 1987.

2 Vgl. Richard Fortey: *Leben – Eine Biographie*. Die ersten vier Milliarden Jahre. München 2002; Steve Jones: *Wie der Wal zur Flosse kam*. Ein neuer Blick auf den Ursprung der Arten. München 2002.

rekten Beobachtung entzogen. Zeitmaschinen zur Rückkehr in die Vergangenheit gibt es ja nur als Science Fiction. Doch wird die Vergangenheit zugänglich durch die Nutzung der historischen Methode in der Erd- und Lebensgeschichtsforschung.<sup>3</sup> Ihre Anwendung in der Biologie führt zur Deszendenztheorie. Durch sie ist bewiesen, dass die Evolution stattgefunden hat und weiter stattfindet. Die Evolution ist eine theoretisch erschlossene Wirklichkeit, die heute als Tatsache anerkannt ist. Die Deszendenztheorie geht davon aus, dass die gegenwärtig existierenden Lebewesen eine nach Ähnlichkeit und Verschiedenheit gradweise abgestufte Mannigfaltigkeit bilden, die im natürlichen System der Organismen abgebildet wird, und zwar in einer vom Einzelnen zum Allgemeinen aufsteigenden Hierarchie von *Kategorien*. Die mit diesen Kategorien erfassten Organismengruppen heißen *Taxa* (Einzahl *Taxon*), in der Botanik auch *Sippen*. Die hauptsächlichen Kategorien sind Art, Gattung, Familie, Ordnung, Klasse, Stamm (in der Botanik: Abteilung) und Reich. Im Bedarfsfall werden weitere Kategorien wie z.B. Unter-gattung und Überfamilie dazwischengeschoben. Die Art Feuerlilie beispielsweise gehört neben anderen Lilienarten zur Gattung Lilie, Familie Liliengewächse, Ordnung Lilienblütige Gewächse, Klasse Einkeimblättrige, Unterabteilung Bedecktsamige Pflanzen, Abteilung Samenpflanzen, Pflanzenreich. Schätzungsweise sind derzeit etwa 1,5 Millionen heute lebende Tierarten und 500 000 Pflanzenarten beschrieben und dem System eingeordnet worden. Die Angaben über die heute tatsächlich auf der Erde lebenden Tier- und Pflanzenarten bewegen sich zwischen 3 und 30 Millionen. Das zeigt, wie wenig wir von unseren Mitbewohnern auf dem Planeten wirklich wissen.

Nach der auf Robert H. Whittaker zurückgehenden Konzeption der fünf Organismenreiche gibt es das Reich Monera (Prokaryoten), das Reich Protocista (eukaryotische Mikroorganismen und Nahestehendes, z.B. Schleimpilze) und die drei Reiche der Pflanzen, der Tiere und der Pilze. Von Carl R. Woese stammt die Einteilung der Lebewesen in drei große Domänen, die Domänen der Bacteria (Eubakterien), der Archaea (Archäobakterien) und der Eukarya (Eukaryonten). Diese Einteilung basiert auf der vergleichenden molekularbiologischen Untersuchung einer bestimmten Gensequenz in der Ribosomen-

3 Vgl. Rolf Löther: Wie die Vergangenheit erkannt wird. Die historische Methode in der Naturforschung. In: Gerhard Banse, Siegfried Wollgast (Hrsg.): Philosophie und Wissenschaft in Vergangenheit und Gegenwart. Festschrift zum 70. Geburtstag von Herbert Hörz. Berlin 2003.

RNA. Wie dem auch sei, die Zeit, da alle Lebewesen entweder dem Tierreich oder dem Pflanzenreich zugeordnet wurden, ist endgültig vorbei.<sup>4</sup>

Die im natürlichen System abgebildete gradweise abgestufte Mannigfaltigkeit wird von der Deszendenztheorie erklärt, und zwar durch die abgestufte Abstammung der heute lebenden Organismenarten von gemeinsamen Vorfahrenarten, die vor ihnen auf der Erde gelebt haben, und deren Evolution auf sich verzweigenden Wegen, durch Charles Darwins „descent with modification“ (Abstammung mit Abwandlung). Das ist die unausweichliche Konsequenz aus der logischen Verknüpfung des natürlichen Systems mit gewissen allgemeinen Aussagen der Biologie. Diese allgemeinen Aussagen sind:

- die durch die Fortpflanzung vermittelte Kontinuität des Lebens seit seiner abiogenen Entstehung aus nichtlebender Materie (Redisches Prinzip „Omne vivum e vivo“ nach Vladimir I. Vernadskij<sup>5</sup>);
- die Kontinuität der spezifischen Organisation der Lebewesen, die auf der Übertragung der genetischen Information bei der Fortpflanzung beruht.
- Die genetisch bedingte Variabilität der Organismen, die letztlich aus ihrer Mutabilität resultiert;
- ein Vorgang, durch den genetisch bedingte Unterschiede zwischen organismischen Individuen einer Art zu Unterschieden zwischen großen Organismengruppen werden. Das ist Darwins „natural selection“ (natürliche Auslese) im „struggle for existence“ (besser mit „Ringens um die Existenz“ als mit „Kampf ums Dasein“ übersetzt). Durch die natürliche Auslese zwischen den Individuen werden die genetischen Unterschiede ausgelesen, d.h. eliminiert oder aber aufbewahrt, akkumuliert und kombiniert, so dass sich daraus in der Aufeinanderfolge der Generationen große Unterschiede in der Organisation der Lebewesen ergeben.

Im Lichte der Deszendenztheorie erweisen sich die höheren systematischen Kategorien – von der Gattung an aufwärts – als Bezeichnungen für mehr oder minder adäquat erfasste Abstammungsgemeinschaften verschiedener Ordnung. Das trifft genau dann zu, wenn die damit bezeichneten Organismengruppen, die höheren Taxa, monophyletische Taxa sind. Die Einzeldinge aber, auf denen das System basiert, sind die Arten, die Spezies. Die Arten sind ihrem Wesen nach keine logischen Klassen von Individuen

4 Vgl. Lynn Margulis: Die andere Evolution. Heidelberg – Berlin 1999, S. 67 ff.; Karl O. Stetter: Feuerzwerge – Zeugen der Urzeit. In: Rolf Emmermann u.a. (Hrsg.): An den Fronten der Forschung. Kosmos – Erde – Leben. Stuttgart – Leipzig 2003.

5 Vgl. Rolf Löther: Das Werden des Lebendigen. Wie die Evolution erkannt wird. Leipzig – Jena – Berlin 1983, S. 41 ff.

(obwohl man die Gesamtheit der organismischen Individuen einer Art auch als logische Klassen oder auch als Mengen traktieren kann), sondern objektiv-reale, materielle Systeme und im Sinne der Logik Individuen. Mit diesen Aussagen bekenne ich mich als Anhänger der von Willi Hennig begründeten konsequent phylogenetischen Systematik (auch „Kladistik“ genannt) und des von Michael Ghiselin, David Hull und mir vertretenen „species-as-individual“-Konzepts, die beide nicht unumstritten sind.<sup>6</sup>

Monophyletische Taxa sind mehrartige Taxa, Einheiten aus zwei oder mehr Arten nebst einer Vorfahrenart, die ihnen ausschließlich eigen ist. Sie entstehen durch Aufspaltung der ancestralen Spezies, und umfassen alle Spezies, die durch Speziationen aus der Vorfahrenart hervorgegangen sind. Die zeitliche Aufeinanderfolge der Speziationsvorgänge bedingt abgestufte stammesgeschichtliche Verwandtschaftsbeziehungen von hierarchischer Struktur zwischen den Arten des monophyletischen Taxons. Peter Ax betrachtet monophyletische Taxa als „geschlossene Abstammungsgemeinschaften der Natur“.<sup>7</sup> Er konstatiert, dass es raumzeitliche Entitäten sind. In räumlicher Hinsicht existieren sie in bestimmter geographischer und ökologischer Verteilung. Zeitlich haben sie einen bestimmten Anfang, d.h., sie beginnen mit der Aufspaltung einer evolutionären Art in letztlich zwei Folgearten und sind weiter zeitlich bestimmt durch die historische Kontinuität aufgrund der Verbindung der Arten durch die aufeinanderfolgenden Speziationen. Zugleich gibt es keinen vertikalen oder horizontalen Zusammenhang zwischen den Arten einer geschlossenen Abstammungsgemeinschaft, durch die diese als Einheit evolviert, weder solches bewirkende Umweltbeziehungen noch Evolutionsmechanismen. Geschlossene Abstammungsgemeinschaften sind stammesgeschichtliche, phylogenetische Einheiten, nicht Einheiten der Evolution. Nur Populationen und Arten (Gruppen von Populationen) sind evolvierende Einheiten, Einheiten der Evolution. Die Geschlossenheit monophyletischer Taxa als Abstammungsgemeinschaften bezieht sich selbstredend auf ihre Vergangenheit und Gegenwart; ihre Zukunft ist offen.

Geschlossene Abstammungsgemeinschaften sind keine materiellen Systeme, da es keine Beziehungen zwischen ihren Arten (ihren Elementen) oder

6 Vgl. Michael Th. Ghiselin: *Metaphysics and the Origin of Species*. Albany 1997; Rolf Löther: *Die Beherrschung der Mannigfaltigkeit. Philosophische Grundlagen der Taxonomie*; Bernhard Wiesemüller, Hartmut Rothe, Winfried Henke: *Phylogenetische Systematik. Eine Einführung*. Berlin – Heidelberg – New York 2002.

7 Vgl. Peter Ax: *Systematik in der Biologie. Darstellung der stammesgeschichtlichen Ordnung in der lebenden Natur*. Stuttgart 1988.

zwischen der Gesamtheit der Arten und der Gesamtheit ihrer Umwelten gibt, durch die sie ein Ganzes bilden. Aber sie unterscheiden sich auch von Mengen und Klassen, weil sie raumzeitlich bestimmte und zeitlich kontinuierliche Gebilde sind. Es handelt sich um historische Entitäten, und zwar um materielle historische Entitäten. Es sind materielle Einheiten aufgrund einer existentiellen (nicht logischen) Beziehung zwischen ihren Elementen, die der später als Psychologe hervorgetretene Kurt Lewin wissenschaftstheoretisch untersucht und „Genidentität“ genannt hat, eine Relation, die auf ihrer Genese beruht<sup>8</sup>, dem Umstand, dass die Elemente in einer zeitlichen Folge auseinander hervorgegangen sind. Nach Lewin ist „Stammgenidentität“ ein Spezialfall von Genidentität.

Stammgenidentität schließt ein, dass geschlossene Abstammungsgemeinschaften der Natur, Artengruppen als historische Entitäten, aufgrund ihrer innewohnenden Vergangenheit individuelle Einheiten sind, ihrer innewohnenden Vergangenheit, die im Genpool der Arten kodiert ist: die Erfolge im Ringen um die Existenz in der sich verzweigenden Aufeinanderfolge der Arten im Verlauf der Evolution. Die gemeinsame inhärente Vergangenheit der Arten geschlossener Abstammungsgemeinschaften bedeutet auch gemeinsame innere Bedingungen zukünftiger Evolution.

Um drei Grundfragen geht es im Hinblick auf die Evolution, um die Fragen nach dem Ob, dem Wie und dem Warum. Die Antwort auf die Frage nach dem Ob ist die Deszendenztheorie, die die Evolution als theoretisch erschlossene Wirklichkeit und damit als Tatsache erweist. Grundlegend für die Antwort auf die Wie-Frage ist die phylogenetische Systematik, die das Grundgerüst für die Rekonstruktion der Evolution in der Vergangenheit, für die Stammesgeschichte oder Phylogenese darstellt. Durch die Molekularbiologie haben sich neue Hilfsmittel für die Rekonstruktion der Vergangenheit durch den Zugriff auf die molekulare Grundlage der inhärenten Vergangenheit ergeben. „Die vielen Millionen Basenpaare in den Genomen der heute lebenden Organismen stellen eine Blaupause der Evolution und Phylogenie eines jeden Individuums dar. Punktmutationen haben das Genom im Verlauf der Zeit in kleinen Schritten verändert. Durch Verdoppelungen von DNA-Abschnitten oder ganzen Genomen, Insertionen und Inversionen wurden Genome umorganisiert oder vergrößert. Alle diese DNA-Veränderungen, die in der Vergangenheit auftraten, sind gespeichert. Wenn es gelingt, diese Informationen zu lesen und zu

---

8 Vgl. Kurt Lewin: *Der Begriff der Genese in Physik, Biologie und Entwicklungsgeschichte. Eine Untersuchung zur vergleichenden Wissenschaftslehre.* Berlin 1922.

interpretieren, dann können wir die nahe, mittlere und ferne evolutionäre Vergangenheit aller Lebewesen rekonstruieren. Theoretisch lässt sich über die DNA-Analyse die Verwandtschaft der Lebewesen bis zur Entstehung des Lebens zurückverfolgen, ohne dass wir Zwischenglieder oder Fossilien kennen. So wie der Archäologe aus alten Scherben auf frühere Kulturen oder der Paläontologe anhand von Fossilien auf die Phylogenie ausgestorbener Arten schließen kann, vermag die molekulare Evolutionsforschung anhand der DNA-Analyse die Entstehung des Lebens auf der Erde sowie die Phylogenie oder Phylogeografie, Art oder Population zu rekonstruieren“, schreiben Volker Storch, Ulrich Welsch und Michael Wink<sup>9</sup>.

Für die Antwort auf die Frage, die von der biologischen Evolutionstheorie beantwortet wird, die Frage nach den Faktoren und bewegenden Kräften der Evolution, sei der Elementarzyklus der Evolution sich zweieltrig-sexuell reproduzierender Lebewesen nach Ivan I. Smal'gauzen<sup>10</sup> skizziert:

1. Ringen der Lebewesen um die Existenz innerhalb der Biogeozönose (Ganzes von Biozönose und Biotop), d.h. eines Ökosystems. Einfluss der Biogeozönose auf die Population durch die direkte und indirekte Elimination ihr angehörender Individuen (Eingangskanal des Zusammenhangs).
2. Damit vergleichende Bewertung der Varianten, d.h. der Phänotypen innerhalb der Population (Umbildung der Population und folglich ihrer genetischen Struktur).
3. Paarung und Vermehrung der ausgewählten Individuen. Erhöhung der Konzentration entsprechender Gene in der Population (Weitergabe und Verstärkung der unmittelbaren, d.h. der genetischen Information).
4. Entwicklung der Individuen nach ererbtem Programm mit direkter Regulation (Umwandlung der genetischen in rückbezügliche Information).
5. Einfluss der Population auf die Biogeozönose durch die Aneignung der Lebensmittel (Ausgangskanal des Zusammenhangs mit der Umwelt, der die Information über den Zustand der Population durch die aktive Lebens-tätigkeit ihrer Individuen enthält). Ringen um die Existenz innerhalb der Biogeozönose (Kontrolle).

Mit 5. schließt sich der kybernetische Regelkreis zwischen Population und Biogeozönose von Neuem. In der Wiederholung wird er zur Evolutionsspirale, die sich in der Zeit vorwärtsschraubt. Damit die Populationen ihre Plätze im Ökosystem behalten, gilt, was die Red Queen in Lewis Carrols

9 Volker Storch, Ulrich Welsch, Michael Wink: *Evolutionsbiologie*. Berlin – Heidelberg – New York 2001, S. 184.

10 Ivan I. Smal'gauzen: *Problemy darvinizma*, 2. Aufl. Leningrad 1969, S. 459.

„Through the Looking Glass“ zu Alice sagt: „Now, *here*, you see, it takes all the running *you* can do, to keep in the same place. If you want to get somewhere else, you must run at least twice as fast as that!”<sup>11</sup>

Smal'gauzens Wiedergabe des Darwinschen Evolutionskonzepts in leicht abgewandelter Form als Zyklus bzw. Regelkreis ist dem Begreifen des Evolutionsprozesses als selbstregulierender und selbstorganisierender Prozess förderlich. Nicht selten wird diese Konzeption mit Herbert Spencers Formel „survival of the fittest“ wiedergegeben, übersetzt mit „Überleben des Passendsten“ und „des Tauglichsten“, aber auch vulgär- und sozialdarwinistisch mit „des Besten“ oder „des Stärksten“. Theodosius Dobzhansky bemerkte zur Spencerschen Formulierung: „Herbert Spencer sprach von der zum ‚Überleben des Passendsten‘ führenden Natürlichen Auslese. Viel zu oft schien diese Ausdrucksweise, besonders in Anwendung auf den Menschen, einen Eroberer nahezulegen, der seine Konkurrenten in einem mörderischen Kampf vernichtet hat. Aber der Geeignetste kann ebenso auch eine weniger romantische Figur sein, nämlich ein Elter der größten überlebenden Nachkommenschaft, die jeden Kampf durch rechtzeitige Unterwerfung vermieden hat. Biologische Eignung wird manchmal durch Konkurrenz und Kampf vorangetrieben und zu anderen Zeiten durch Zusammenwirken und Unterwerfung. Die Natürliche Auslese ist von Anfang bis zu Ende opportunistisch; sie fördert die genetische Ausrüstung, die den reproduktiven Erfolg begünstigt, ganz gleich, wie er zustande kommt. Und sie hat die Vorteile wie die Schwäche aller Opportunisten – sie vergrößert die Chance des unmittelbaren Erfolges, allerdings oft um den Preis von Schwierigkeiten auf weitere Sicht. Denn der reproduktive Erfolg ist kein völlig adäquates Maß der Vortrefflichkeit einer biotischen Organisation. Er fördert nicht notwendigerweise die Fähigkeit, an zukünftige Änderungen der Umgebung angepasst zu werden.“<sup>12</sup> Man schätzt, dass 90–99 Prozent der Arten, die jemals auf der Erde gelebt haben, nachkommenlos ausgestorben sind. Doch wie bei den Ärzten ist es auch bei der Evolution: Ihre Misserfolge verdeckt die Erde, ihre Erfolge bescheint die Sonne.

Die Evolution ist kein langsam und stetig in gleichbleibendem Tempo vorangehendes Dahinfließen. Das Gesamtgeschehen ist zeitlich strukturiert

11 Lewis Carroll: *Alice's Adventures in Wonderland & Through the Looking Glass*. New York etc. 1981, S. 127 („Du musst aus Leibeskräften rennen, wenn du am selben Ort bleiben willst. Und wenn du woanders hin willst, musst du doppelt so schnell rennen.“ – Lewis Carroll: *Alice im Wunderland/Alice im Spiegelland*. Leipzig 1981, S. 148).

12 Theodosius Dobzhansky: *Die Ursachen der Evolution*. In: Gerhard Heberer, Franz Schwanitz (Hrsg.): *Hundert Jahre Evolutionsforschung*. Stuttgart 1960, S. 42.

durch nebeneinander und nacheinander stattfindende Teilvorgänge von unterschiedlicher Dauer. Für den Zugang des Erkennens zu ihnen bestehen methodische Unterschiede zwischen der Makroevolution oder transspezifischen Evolution, der Aufeinanderfolge der Arten in der Stammesgeschichte, und der Mikroevolution oder infraspezifischen Evolution, der Evolution der Populationen im Artrahmen bis hin zur Entstehung neuer Arten. Die zeitlichen Bestimmungen der Makroevolution ergeben sich aus den relativen und absoluten oder numerischen Altersbestimmungen der Geologie.

Relative Altersbestimmung beantwortet die Frage, was älter oder jünger, früher oder später ist und beruht darauf, dass bei Schichten von Sedimentgesteinen in ungestörter Lagerung das Darunterliegende älter ist als das Darüberliegende. Die Identifizierung der gleichen Schichten in verschiedenen Territorien erfolgt durch die so genannten Leitfossilien. Ideale Leitfossilien sind erdweit verbreitet und schichtenspezifisch. Für die absolute oder numerische Datierung, die zu Altersangaben in Jahreszahlen führt, haben Zerfallsprozesse und -produkte radioaktiver chemischer Elemente in den Gesteinen besondere Bedeutung.

Mikroevolution, die vordere Prozessfront der Evolution erschließt sich in der Kombination von numerischer Altersbestimmung mit Beobachtung und Experiment, ist im Laboratorium z.B. mit Populationen von *Drosophila*-Fliegen oder Bakterien machbar und ist auch in praktischer Erfahrung leidvoll spürbar. Ergiebig für die Evolutionsforschung unter Naturbedingungen sind besonders Beobachtungen auf Inseln wie dem Galapagos-Archipel oder Hawaii und in Gewässern wie dem Baikalsee oder dem afrikanischen Victoria-See, Wasserinseln im Festland, mit ihrer endemischen Tierwelt, Arten, die nur dort und sonst nirgends auf der Erde vorkommen, die dort entstanden sind. Solche Inseln und Seen sind für die Evolutionsforschung gleichsam natürliche Laboratorien, um natürliche Auslese und andere Evolutionsfaktoren sowie die Speziation zu studieren.<sup>13</sup>

Der Victoria-See ist 200 000 Jahre alt, doch war er vor 12 500 Jahren einmal vollständig ausgetrocknet. Nach der letzten Schätzung gab es einmal in ihm mehr als 500 verschiedene endemische Arten von Buntbarschen (Cichliden). Ihre Anzahl ist inzwischen durch Eutrophierung des Sees und in den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts eingesetzte Nilbarsche, Raubfische, die

---

13 Vgl. Tijs Goldschmidt: Darwins Traumsee. Nachrichten von meiner Forschungsreise. München 1999; David Quammen: Der Gesang des Dodo. Eine Reise durch die Evolution der Inselwelten. München 2001; Jonathan Weiner: Der Schnabel des Finken oder der kurze Atem der Evolution. München 1996.

sich rasch vermehrt haben, erheblich dezimiert worden. Die Artenfülle der Buntbarsche des Victoria-Sees muss folglich in den letzten 12 500 Jahren entstanden sein.<sup>14</sup>

Man muss nicht unbedingt zum Victoria-See oder zu den Galapagos-Inseln fahren, um Evolution in Aktion und ihre Auswirkungen zu erfahren. Sie findet um uns und auch in uns überall statt, denken wir nur an gegen Insektizide resistent gewordene Insekten sowie gegen Arzneimittel resistent gewordene Krankheitserreger, deren Evolution in uns stattfindet. Gegen die Evolution hat die Insektizide und Antibiotika produzierende chemische und biotechnische Industrie auf Dauer schlechte Chancen. „Die natürliche Selektion hat mit Hilfe der Dummheit über die Medizin triumphiert. In den Vereinigten Staaten werden jedes Jahr zwölf Millionen Antibiotikadosen gegen Erkältung oder Halsentzündung gegeben – obwohl sie in solchen Fällen nicht helfen. In vielen europäischen Ländern wird täglich mehr als eine Tonne verbraucht, und das meiste davon wird vergeudet. Noch schlimmer sieht es in der Dritten Welt aus: In Kenia werden starke Medikamente wie Tetracyclin und Ampicillin auf der Straße verkauft. Eine noch größere Menge bringen die Bauern in die Umwelt, die solche Chemikalien dem Tierfutter zusetzen. Zu ihren ‚wachstumsfördernden‘ Mitteln gehören Substanzen, die von der Medizin eines Tages dringend benötigt werden könnten. Sie zu verfüttern könnte fast dazu gedacht sein, die Evolution absichtlich zu beschleunigen“, vermerkt Steve Jones<sup>15</sup>. Auch sonst befördert der Mensch die Evolution kräftig. Infolge der Klimaveränderung verändern sich die Verbreitungsgrenzen der Arten. Als blinde Passagiere des globalen Verkehrs gelangen Arten in neue Umwelten. Das anthropogene Artensterben macht ökologische Nischen für die Überlebenden frei. Alles Herausforderungen, auf die die Evolution antwortet. Mit der Züchtung von Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen betreibt der Mensch von ihm gesteuerte und kontrollierte Evolution. Und beim Menschen selbst steht die evolutionäre Veränderung auch nicht still.

Auch für die Makroevolution sind Vorstellungen von den Zeitmaßen von Evolution und Stammesgeschichte, die sich am geologischen Uniformismus von James Hutton und Charles Lyell und dem darauf beruhenden Gradualismus Darwins orientierten, inzwischen relativiert worden. Nach zweihundert Jahren Diskussion über Katastrophismus und Aktualismus und ihre evoluti-onstheoretischen Pendanten wird deutlich, dass es sich nicht um unversöhn-

---

14 Tijs Goldschmidt, a.a.O., S. 318 f.

15 Steve Jones, a.a.O., S. 146; vgl. Randolph M. Nesse, George C. Williams: Warum wir krank werden. Die Antworten der Evolutionsmedizin. München 1997, S. 67 ff.

liche Alternativen handelt.<sup>16</sup> Für das Aussterben der Arten zeichnen sich neben einem stets stattfindenden, zur Evolution gehörenden „normalen“ Aussterben katastrophale Einschnitte in die Stammesgeschichte ab. Im Phanerozoikum, also in den letzten 545 Millionen Jahren, haben mindestens fünf Massenaussterben globalen Charakters stattgefunden: im späten Ordovizium (vor 440-450 Millionen Jahren), im Oberdevon (vor 360-370 Millionen Jahren), am Ende des Perm (vor 250–255 Millionen Jahren), am Ende der Trias (vor gut 200 Millionen Jahren) und an der Kreide-Tertiär-Grenze (vor 65 Millionen Jahren). Der größte Einschnitt fand am Ende des Perm statt, als etwa 50 Prozent der marinen Wirbellosen-Familien verschwanden und wohl über 80 oder gar 90 Prozent aller Arten mariner Wirbelloser. Außer diesen fünf Massenaussterben hat es weitere Phasen des Aussterbens in großem Ausmaß gegeben. Eine gemeinsame Ursache aller Massenaussterben hat es allem Anschein nach nicht gegeben und die Vorgänge waren auch nicht mit der Stoppuhr zu messen, sondern haben sich über Hunderttausende und Millionen Jahre hingezogen.<sup>17</sup> Unter evolutionärem Aspekt bedeuteten die Massenaussterben zugleich Innovationsschübe in der Geschichte der Biosphäre, man denke nur an die Entfaltung der Säugetiere im Tertiär nach der Katastrophe am Ende der Kreidezeit.

In den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts entstanden Hypothesen, nach denen Massenaussterben periodisch auftreten und durch kosmische Vorgänge verursacht werden. Durch sie soll die Erde periodisch in ein intensives Bombardement durch Meteoriten oder Kometen geraten. So wird angenommen, dass sich irgendwo jenseits des Pluto ein zehnter Planet namens „Nemesis“ befindet, der sich auf einer stark elliptischen Bahn bewegt und etwa ein Zehntel der Sonnenmasse besitzt. Passiert er die Oortsche Wolke aus Staub und Gesteinsbrocken, lenkt er Bestandteile dieser Materiewolke aus ihrer Bahn und einige von ihnen kollidieren mit der Erde. Da Nemesis die Sonne einmal in 26 Millionen Jahren umrunden soll, soll dieses Bombardement aller 26 Millionen Jahre stattfinden und ein Massenaussterben hervorrufen. Eine andere Variante solcher Hypothesen postuliert, dass die Sonne einen dunklen Begleiter hat, der die Nemesis-Rolle spielt. Allerdings mangelt es im Himmel und auf Erden an Beweisen für diese Hypothesen. Da lobe ich mir die Faust-

16 Vgl. Eduard I. Kolcinskij: Neokatastrofizm i selekcionizm – vecnaja dilemma ili vozmožnoč' sinteza? Istoriko-kritičeskie ocerki. St. Petersburg 2002.

17 Vgl. Tjeerd H. van Andel: Das neue Bild eines alten Planeten. Die Erkenntnisse der dynamischen Erdwissenschaft. München 1992; Vincent Courtillot: Das Sterben der Saurier. Erdgeschichtliche Katastrophen. Stuttgart 1999.

regel der Paläontologen, wenn es um die Erklärung irdischer Vorgänge geht: „Der Kosmos zuletzt!“ Ausgeschlossen werden damit kosmische Ursachen irdischer Katastrophen nicht, aber diese heuristische Regel richtet sich gegen das Postulieren kosmischer Ursachen als *Deus ex machina*.

Wenn es um die Zeitmaße der Evolution geht, ist auch der so genannte Big Bang, der Urknall in der Evolution der Tiere zu erwähnen, der mit Beginn des Kambriums einsetzte, das vor ca. 545 Millionen Jahren begann. In dieser „kambrischen Explosion“ erschienen in nur etwa 10 Millionen Jahren Vertreter praktisch all jener Tierstämme, die heute noch existieren. Darunter befand sich *Pikeia gracilens*, ein ca. 3 cm langes Tierchen, das als Kandidat dafür gilt, Ahne der Chordatiere zu sein, also des Stammes, zu dem wir als Angehörige des Unterstammes der Wirbeltiere und seiner Klasse Säugetiere gehören. Vermutlich war die kambrische Explosion ein Innovationsschub nach einer gewaltigen globalen Katastrophe im Präkambrium.<sup>18</sup>

Aus der „Natural Theology“ (1802) William Paleys stammt folgendes Gleichnis: Fände man eine Uhr, würde man auch ohne etwas über ihre Entstehung zu wissen, angesichts ihres komplizierten Baus und ihrer präzisen Funktion darauf schließen, dass die Uhr einen Schöpfer gehabt haben muss, der sie entworfen und gebaut hat. Bei den Lebewesen aber, in deren Bau und Funktionen die Andeutung eines Plans, eines Entwurfs, noch viel ausgeprägter ist, müsse man analog auf einen göttlichen Schöpfer schließen. Richard Dawkins nannte, sich auf diese Version des teleologischen Gottesbeweises beziehend, die natürliche Auslese den „blinden Uhrmacher“, der die Lebewesen ohne Plan und Entwurf gestaltet.<sup>19</sup> Die Metapher vom blinden Uhrmacher gewinnt eine spezielle Bedeutung, wenn man sie mit einer anderen Metapher, der von den „biologischen Uhren“ für die Zeitstrukturen des organismischen Lebens, verbindet: Die natürliche Auslese ist der „blinde Uhrmacher“ der „biologischen Uhren“.

„Die fachwissenschaftliche Literatur stellt regelmäßig fest, dass sich biologische Uhren entwickelten, weil das dem Organismus das Überleben ermöglichte. Diese Sehweise ist genauso unpassend wie die Behauptung, die Musiker eines Orchesters hülften dem Orchester, Musik zu machen. Musiker helfen nicht dem Orchester, sie *sind* das Orchester. Ganz ähnlich helfen bio-

18 Vgl. Gabrielle Walker: Schneeball. Die Geschichte der globalen Katastrophe, die zur Entstehung unserer Artenvielfalt führte. Berlin 2003.

19 Richard Dawkins: Der blinde Uhrmacher. Ein neues Plädoyer für den Darwinismus. München 1990.

logische Uhren einem Lebewesen nicht beim Überleben, sie sind das Lebewesen.

Die organische Gegenwart ist ein Zeichen für das Bedürfnis des Lebens, *notwendige Gleichzeitigkeit* durch ununterbrochene innere Koordination aufrechtzuerhalten. Dieses Bedürfnis unterscheidet Leben von nichtlebender Materie“, vermerkt Julius T. Fraser<sup>20</sup>.

Durch die Zeitstrukturen der Lebensvorgänge sind die Lebewesen mit Zeitstrukturen der astrophysikalischen und geophysikalischen Umwelt synchronisiert. Auch bei Fossilien zeichnen sich Spuren periodischer Lebensvorgänge ab. Sie ermöglichen ihrerseits Rückschlüsse auf ihre Umwelten, z.B. Wachstumsringe von Bäumen auf Witterung und Klima. Korallen lagern täglich eine dünne Kalkschicht ihres Skeletts ab. Die Folge dieser Tageslamellen lässt Monats- und Jahreszyklen erkennen. Colin Scrutton und seine Mitarbeiter haben diese Zyklen bei guterhaltenen fossilen Korallen ausgezählt. „Überraschend ist das daraus gewonnene Ergebnis, dass vor rund 400 Millionen Jahren der Mond länger, nämlich 30 Tage, für einen Umlauf um die Erde brauchte“, resümiert Lambert B. Halstead die Ergebnisse dieser Untersuchungen.<sup>21</sup> „Noch erstaunlicher war die Feststellung, dass vor rund 570 Millionen Jahren, d.h. etwa zu Beginn des Kambrium, das Jahr 428 Tage umfasste und dass vor ungefähr 400 Millionen Jahren, also im Silur, ein Jahr 385 bis 405 Tage hatte. Die Astronomen hatten schon früher vermutet, dass sich infolge der Gezeitenreibung die Erdumdrehung verlangsamt haben könnte, und zwar um 0,0016 Sekunden in 100 Jahren. Der an den Korallen geführte Nachweis einer Zunahme der Tageslänge im Verlauf der Erdgeschichte bestätigt diese Berechnungen.“

Mit der Historizität von Tag und Jahr haben auch circadiane und circannuale Biorhythmen eine historische Dimension. Aufgrund der Transformation evolutionär gewordener Zeitstrukturen des Lebensgeschehens in mineralische Raumstrukturen geben diese Auskunft über die Rhythmen des Lebens in vergangene Zeit. Diese Sachlage lässt an evolutionäre und Paläo-Chronobiologie denken.

---

20 Julius T. Fraser: Die Zeit. Auf den Spuren eines vertrauten und doch fremden Phänomens. München 1991, S. 164.

21 Lambert B. Halstead: Der Urzeit auf der Spur – Abenteuer Erdgeschichte. Die Suche nach den Zeugnissen vergangenen Lebens. Stuttgart 1991, S. 59.

*Das Kuratorium der Stiftung der Freunde der Leibniz-Sozietät e.V. hatte sich bekanntlich an jene Mitglieder der Leibniz-Sozietät gewandt, die beruflich (noch) stark beansprucht sind, und sie gebeten, in einem kürzeren Beitrag über ihre wissenschaftliche Arbeit zu berichten und Fragen zu nennen, die aus ihrer Sicht in der Leibniz-Sozietät diskutiert und weiter bearbeitet werden sollten. Die Veröffentlichung der Einsendungen setzen wir hier mit den Beiträgen von Bodo Krause und Christian Bauer fort. Angeregt durch letzteren, hat uns Gisela Jacobasch ihren Beitrag zur Verfügung gestellt.*

Bodo Krause

## **Nutzung formaler Modelle in der Psychologie – als Mathematiker in der psychologischen Forschung**

### **1. Einsatzbereiche eines Mathematikers in der psychologischen Forschung**

Die Einsatzbereiche eines Mathematikers in der psychologischen Forschung bestimmen sich aus dem Gegenstandsbereich der Psychologie, dem menschlichen Erleben und Verhalten und der Tatsache, dass psychische Eigenschaften einer direkten Beobachtung kaum zugänglich sind. Dies begründet den klassischen Modellzugang der psychologischen Forschung, der im Sinne der „black-box“-Methodik versucht, vom beobachteten Verhalten auf die zugrunde liegenden psychischen Eigenschaftsausprägungen und damit die verursachenden (objektiven und subjektiven) Bedingungen des Verhaltens zu schließen. Damit wird der intuitiv erwartete Einsatzbereich eines Mathematikers in der psychologischen Forschung über die reine (statistische) Datenverarbeitung (vgl. Krause und Metzler, 1978) hinaus wesentlich auf die Anwendung der Modellierungsmethodik erweitert, d.h. auf die Entwicklung, Prüfung und Verbesserung von Modellen psychischer Eigenschaften und Prozesse. In meiner wissenschaftlichen Arbeit waren dies vor allem zwei Bereiche:

a. die *Modellierung von Beobachtungssituationen und -ergebnissen* mit dem

Ziel, individuelle Fähigkeits- oder Eigenschaftsausprägungen zu erfassen (Grundlage des Konzepts indirekter Messungen psychischer Eigenschaften) und aus strukturellen Annahmen zu erklären, und

- b. die *Modellierung psychischer Prozessverläufe* insbesondere im Rahmen der Informationsverarbeitung. Hierbei stehen drei Zielstellungen im Vordergrund, die unter rein experimenteller Vorgehensweise nur schwer erreichbar wären:

b1) die *Prüfung von Hypothesen über die menschliche Informationsverarbeitung*. Dabei sind im Sinne unseres Anliegens folgende Hypothesen von besonderem Interesse:

- die klassische Hypothese, dass das Assoziationsprinzip als universelle Grundlage des Lernens gilt, oder
- die Hypothese über den anforderungsabhängigen Wechsel von paralleler zu serieller Informationsverarbeitung, verbunden mit dem Wechsel der Repräsentationsebene der Anforderung, oder
- die Hypothese über den Einfluss von Vorwissen auf die Informationsverarbeitung im Lernen und Denken.

b2) der *Vergleich von menschlichem und modellbasiertem Verhalten*, um die Unterschiede in den Informationsverarbeitungsprozessen zu kennzeichnen. Hierzu gehören folgende Untersuchungsaspekte:

- Prüfung von Hypothesen über unterschiedliche Verarbeitungsstrategien
- Prüfung von Hypothesen über den Einfluss der Kodierung (Repräsentation) auf den Schlussprozess
- Prüfung von Hypothesen über den Einfluss variierten Vorwissens auf den Schlussprozess.

b3) die *Modellierung von anforderungsabhängiger Adaptivität* an Umgebungsbedingungen, die sich psychologisch mit Stichworten wie Flexibilität, Umstrukturierung, kognitiver Ökonomie verbindet. Dies umfasst Prozesse des Lernens und der Selbstorganisation.

In diesem Zusammenhang interessiert auch die Frage danach, ob moderne Modellierungsansätze der Informatik oder Künstlichen Intelligenz Zugangsformen zur psychologischen Prozessanalyse der Informationsverarbeitung erschließen, die mit dem bisherigen Methodeninventar der experimentellen Psychologie nicht zufrieden stellend geprüft werden können.

Die beiden wissenschaftlichen Themenbereiche a) und b) sollen nachfolgend in ihrer fachwissenschaftlichen Entwicklung gekennzeichnet und mit empirischen Befunden differenziert werden, mit dem Ziel, weiterführende

Fragestellungen auch für die interdisziplinäre Diskussion zu begründen. Dabei ist insbesondere für den zweiten Themenbereich eine entscheidende Weiterentwicklung der Nutzung formaler Modelle zu kennzeichnen, die eng mit der Entwicklung der modernen Rechentechnik und Informatik verbunden ist. Beschränkte sich die Nutzung formaler Modelle vorerst vor allem auf beschreibende Ansätze (z.B. Klix und Krause, 1969) mit dem Ziel, strukturelle Beziehungen zwischen Anforderungs- und Fähigkeitskomponenten zu begründen und zur psychologischen Theoriebildung zu nutzen (vgl. das Compartment-Modell für das Gedächtnis (Klix 1984) oder die Faktorenthorien der Intelligenz oder Persönlichkeit) so ermöglichten es die zunehmenden Möglichkeiten von Computersimulationen später zunehmend, differenzierte Hypothesen über kognitive Prozessverläufe darzustellen und gezielte Verhaltensprädiktionen zu begründen (z.B. Klix 1970, 1976, 1980; Dörner, 1989, 2002). Dies begründet einen sehr effektiven und objektivierbaren Zugang zur psychologischen Theoriebildung. Die Bedeutung dieser Entwicklung für die Psychologie kennzeichnet Dörner (2002, S. 18) mit der Feststellung „Man kann behaupten, dass eine wirkliche theoretische Psychologie gar nicht möglich war, ehe es Computer gab. Denn vorher war es einfach nicht möglich, das Verhalten eines Systems, welches aus vielen tausend Zusammenhangsaussagen besteht, zu analysieren“.

## **2. Nutzung formaler Modelle bei der Modellierung von Beobachtungssituationen (Messen psychischer Eigenschaftsausprägungen und ihrer Veränderung)**

Die Modellierung von Beobachtungssituationen ist mit der Frage nach der Messbarkeit psychischer Eigenschaft direkt verbunden und grundlegend für die Herausbildung der bekannten Intelligenz- und Persönlichkeitstheorien. Als Ursprünge seien die Zugänge der Psychophysik (Weber, 1834; Fechner, 1860; u.a.), die Begründung der Faktorenthorien (Spearman, 1904; Thurstone, 1947; Cattell, 1952; vgl. Überla, 1968), aber auch die Vergessenskurve (Ebbinghaus, 1890) benannt, die alle mathematische Modelle und Methoden nutzten, um im jeweiligen Phänomenbereich das subjektive Erleben von physikalischen Reizstärken, die Wirkung von Fähigkeiten auf das Verhalten oder die Veränderung von Gedächtnisbesitz in der Zeit zu beschreiben und damit auch hypothetisch zu erklären.

Eine wichtige Etappe ist durch die Begründung einer Datentheorie durch Coombs (1960, 1964) ausgewiesen, weil hier ein generalisierter Anspruch auf

die modelltheoretische Erklärung der Entstehung von Daten unter unterschiedlichen Typen von Erhebungsmethoden formuliert und dann z.B. bei Roskam (1983) exemplarisch und theoretisch fundiert ausgearbeitet ist. In dieser Zeit entstand auch der Ansatz der Item-Antwort-Modelle oder latenten Strukturanalyse, der insbesondere der Analyse und Erklärung qualitativer Daten gewidmet war. Hierzu gehören u.a. die Ansätze der Likert-Skalen (wie z.B. Guttman-Skala, latente Distanzanalyse, latente Klassenanalyse, logistische Modelle) und die Ansätze mit Thurstone-Skalen (wie z.B. Thurstone-Skalierung, Entfaltungsmodelle nach Coombs) (vgl. Krause, 1977; 2000).

Allen diesen Zugängen war gemeinsam, dass sie vorerst zur Kennzeichnung stationärer Beobachtungssituationen angelegt, also im methodischen Sinne als Ein-Punkt-Beobachtungen hinsichtlich der Zeit zu kennzeichnen waren. Dies ist z.B. für eine Status-quo-Erfassung geeignet (z.B. in der Statusdiagnostik), wird aber erst durch die Erweiterung auf die Erfassung von Veränderungen in der Zeit psychologisch vollständig bedeutsam (Veränderungsmessung, Verlaufsmessung). Wesentlich für die Modellierung solcher Veränderungen ist das Ziel der Veränderungsanalyse. Besteht dieses Ziel in der Erklärung des ablaufenden Prozesses, dann kommen hier (abhängig vom Datenniveau) Methoden der Verlaufs- und Zeitreihenanalyse zur Anwendung (vgl. Möbus und Nagl, 1983). Besteht das Ziel jedoch in einer Interventions-evaluation, d.h. der Prüfung der Wirkung einer externen Einflussnahme auf den Prozess, dann entsteht zusätzlich die Frage nach den Ursachen von Veränderungen. Dabei sind zumindest drei Quellen von Veränderung zu unterscheiden: der Interventionseffekt (treatment effect), die Wirkung zusätzlicher Einflussgrößen (remission effect) und die Messfehler (error effect), die bei den wiederholten Beobachtungen nicht unabhängig sind und eigenständige Veränderungswirkungen hervorrufen können (vgl. Krause, 1982, 1987). Wichtige Ergebnisse unserer Arbeit waren:

- die Begründung der Modellierung von Veränderungsmesssituationen durch die Klasse der Fehler-in-den-Variablen Modelle, die es insbesondere gestattete, die Korreliertheit der Messfehler zu berücksichtigen und als Konstituente von Veränderungen abzuspalten (Krause, 1982; Krause und Raykov, 1987, 1989; Raykov, 1986),
- die Relativierung des Anfangswertgesetzes von Wilder (Law of initial value LIV), das ursprünglich als biologisches Grundgesetz diskutiert und verstanden wurde, in ein lokales und ein globales LIV, für die Prüfbedingungen ihres Auftretens begründet wurden (Krause und Raykov, 1989),
- die Begründung eines methodischen Standards für die Therapieevaluation

(Metzler und Krause, 1999), der in Anlehnung an das Prinzip der „good clinical praxis“ methodische Rahmenbedingungen für Interventionsevaluationsstudien in der Psychologie formuliert, die für die Sicherung der Aussagekraft solcher Studien unerlässlich sind,

- die Begründung und Zusammenstellung von methodischen Anforderungen für die verkehrspsychologische Rehabilitation (Krause, 2002, 2003).

### **3. Nutzung formaler Modelle in der Modellierung kognitiver Prozesse**

Die Nutzung formaler Modelle bei der Analyse kognitiver Prozesse dient allgemein dem Ziel, die Bedingungen der Herausbildung kognitiver Leistungen zu prüfen und damit diese Prozesse nachbildbar zu machen. Dies begründet den Modellzugang zur Theoretischen Psychologie. Wir wollen hier angelehnt an eigene Forschungsarbeiten verdeutlichen, welche Aussagevielfalt aus diesem Zugang der Nutzung formaler Modelle zu erwarten und zu begründen ist. Dazu ist sowohl die Vielfalt der aktuellen Entwicklungen und Verfügbarkeit formaler Modelle zu beachten als auch die Vielfalt kognitiver Prozesse zu berücksichtigen.

Von der Verfügbarkeit formaler Modelle lässt sich ein breites Spektrum auffächern, das von diskreten Algorithmen und formalen Grammatiken über die Vielfalt neuronaler Netze bis hin zu genetischen Algorithmen und Evolutionsstrategien reicht. Allen Modellen ist gemeinsam, dass sie unschwer über die modernen Computersysteme realisierbar sind und damit zur Simulation kognitiver Prozesse verfügbar sind. Entscheidend bleiben zwei Fragen:

- a. die Frage nach der Unterschiedlichkeit der Handlungsprinzipien, die diesen Modellen ihre Funktionsfähigkeit geben, und
- b. die Frage nach den speziellen kognitiven Prozessen, die durch diese Modelle mit Erkenntnisgewinn analysiert werden können.

Wir wollen die Wechselwirkung dieser beiden Komponenten an Beispielen verdeutlichen:

#### **3.1. Die Modellierung assoziativer Lernprozesse mit neuronalen Netzen**

Es gibt in der Psychologie eine lange Diskussion über die Frage, ob und welche elementaren Lernprozesse durch die Wirkung des Assoziationsprinzips, d.h. durch Verstärkung und Hemmung von Verbindungen, erklärt werden können. Es war Köhler (1918), der mit seinen Versuchen zum Diskriminationslernen (u.a. bei Haushühnern) den Nachweis erbrachte, dass diese Leis-

tungen nicht auf das Assoziationsprinzip reduzierbar waren, sondern hier Generalisierungs- und Abstraktionsprozesse in die Anforderungsbewältigung eingehen (vgl. Pearce, 1997; Krause, 2003).

Für die Modellierung solcher Lernprozesse gibt es eine weitere Gruppe von Befunden, die das Modell von Rescorla und Wagner (1968, 1972) begründen. Sie belegen, dass assoziatives Lernen über Prozesse der Verstärkung und Hemmung beschrieben werden können und damit assoziatives Lernen folgendem Modell für die Veränderung DE der Lerneffizienz (Kontingenz- oder Bindungsstärke) genügt:

- für excitatorische Wirkungen:  $\Delta E_i = \alpha_i \cdot \beta_1 \cdot (\lambda - \sum E_k)$
  - für inhibitorische Wirkungen:  $\Delta E_i = \alpha_i \cdot \beta_2 \cdot (0 - \sum E_k)$ .
- (Es bezeichnen  $\alpha_i$  die bestehende Aktivität,  $\beta_1, \beta_2$  die jeweilige Lernrate und  $\lambda$  das maximale Niveau der Assoziationsstärke).

Ein dritter Befund (Gluck und Bower, 1988; Estes u.a., 1989) begründet nun die Äquivalenz dieses Rescorla-Wagner-Modells mit einem einfachen neuronalen Netz.

Dies war der Ausgangspunkt für unsere Überlegung: Wenn neuronale Netze mit dem Rescorla-Wagner-Modell äquivalent sind und dieses mit dem Lernen durch Assoziieren äquivalent ist, dann gibt ein Vergleich von menschlichen Lernleistungen mit Modellsimulationen von neuronalen Netzen Aufschluss darüber, welche Lernprozesse vergleichbar ablaufen und damit dem Assoziationsprinzip entsprechen und bei welchen Lernanforderungen Unterschiede auftreten, die dann die Grenzen des Assoziationsprinzips im menschlichen Lernen kennzeichnen.

Ein erster Gedanke zur experimentellen Analyse besteht nun darin, durch eine Variation der Schwierigkeit einer Lernanforderung die Hypothese prüfbar zu machen, dass rein assoziatives Lernen (aus kapazitiven Gründen!) nur bis zu einem bestimmten Schwierigkeitsgrad möglich sein dürfte und danach nicht mehr. M.a.W. erfordern hohe Schwierigkeiten zu ihrer Bewältigung weiterführende Lernstrategien. Im Sinne unseres Modellierungsgedankens bedeutet dies, dass mit wachsender Schwierigkeit menschliches Lernen vom assoziativen Lernen nach dem Rescorla-Wagner-Modell verschieden und unterscheidbar sein sollte.

Aus den Ergebnissen (vgl. Zusammenfassung in Krause, 2003a) sei ein Befund hier ausgewählt, der den Vergleich der Schwierigkeiten betrifft. Dargestellt wird die Rangreihe der Schwierigkeiten, wie sie sich aus dem Lern-

~~aufwand von Probanden und den neuronalen Netzen (mit dem Lernprinzip „error back propagation“) ergibt:~~

Lernanforderung Lernsystem	AND	OR	NAND	NOR
Neuronale Netze	3	1	4	2
Probanden	1	2	3	4

Tab. 1: Schwierigkeitsrangreihen des Erwerbs ausgewählter logischer Funktionen

Wir sehen sowohl beim Vergleich von AND und OR als auch beim Vergleich der negierten Funktionen NAND und NOR einen genau entgegengesetzten Befund bei Netzen und Probanden. Für Probanden ist in beiden Fällen die OR-Verknüpfungen schwieriger als die AND-Verknüpfungen. Darüber hinaus sind für die Probanden insgesamt die negierten Verknüpfungen schwieriger als die nicht negierten. Im Gegensatz dazu sind bei beiden neuronalen Netzen die OR-Verknüpfungen leichter als die AND-Verbindungen, wobei jeweils wieder die Negation die Schwierigkeit erhöht. Allgemein macht das Ergebnis einen Befund deutlich:

Für neuronale Netze, die nach dem Assoziationsprinzip lernen, ist der Erwerb von OR-Verknüpfungen leichter als der Erwerb von AND-Verknüpfungen. Bei den Probanden ist dies genau umgekehrt; Probanden erwerben AND-Funktionen leichter als die OR-Funktionen. Dies bedeutet, dass der Schwierigkeitsanstieg eines rein assoziativen Lernens vom OR zum AND im Verhalten der Probanden genau gekippt wird. Dies jedoch ist nur dann möglich, wenn der wachsende Schwierigkeitsgrad die Probanden dazu bringt, das rein assoziative Lernprinzip zu überwinden und Abstraktionsprozesse in die Verhaltensregulation einzubeziehen. Solche Abstraktionsprozesse setzen jedoch Invarianten (Gemeinsamkeiten) voraus, wie sie bei der AND-Funktion durch das gemeinsame Auftreten von Merkmalen gegeben sind.

### 3.2. Die Modellierung induktiver Schlussprozesse

Ein wichtiger Ausgangspunkt zur Untersuchung induktiver Schlussprozesse waren die Befunde zum Vermeidungslernen der Arbeitsgruppe um Lachnit (1994). Diese Untersuchungen wurden mit den Paradigmen des „positive“ und „negative patterning“ durchgeführt. Sie zeigten, dass die Variation der Manifestationshäufigkeit der Merkmale für das „negative patterning“ keinen Einfluss auf den Lernprozess hat. Dies ist mit dem Prinzip des Assoziationslernens unvereinbar und begründet den Schluss, dass das Assoziationsprinzip

zur Befunderklärung nicht ausreichend ist. Hier setzen unsere Gedanken an (Krause und Gauger, 1997, Krause, 1990, 1991, 1996, 2001):

Allgemein gehen wir von dem Grundgedanken aus, dass bei allen Formen des Diskriminationslernens zwei Eigenschaften für den Lernprozess entscheidend sind:

- a. die Eigenschaften der Lernanforderung in Bezug auf die Merkmalsbeziehungen dahingehend, ob die Merkmale unabhängig voneinander oder konfundiert sind. (So treten im obigen Beispiel bei der OR-Funktion die beiden relevanten Merkmale unabhängig voneinander auf (oder nicht), während beim AND die Anhängigkeit des gemeinsamen Auftretens vorliegt.) Dabei sind unterschiedliche Formen der Konfundierung denkbar:
  - direkte Merkmalsabhängigkeiten (z.B. im Sinne einer Implikation),
  - indirekte Merkmalsabhängigkeiten von dritten Merkmalen,
  - relationale Abhängigkeiten, die in strukturellen oder funktionalen Abhängigkeiten bestehen können;
- b. die individuellen Lernvoraussetzungen, die sich aus Vorwissen und Erfahrungen ergeben und damit Lernhaltungen und -einstellungen begründen.

Kontrolliert man nun die Eigenschaften der Lernanforderung, dann kann man die Wirksamkeit unterschiedlicher Lernvoraussetzungen prüfen. Umgekehrt führt die Kontrolle der Lernvoraussetzungen zur Prüfung der Wirkung unterschiedlicher Lernanforderungen auf den Lernprozess. Und diese Beziehung gilt sowohl für unsere Probanden als auch für die Modelle der Informationsverarbeitung. Damit sind gleichzeitig methodische Möglichkeiten erschlossen, um aus dem Vergleich menschlicher und modellierter Verhaltensweisen Hypothesen über den Prozess der Informationsverarbeitung zu prüfen. Wir demonstrieren dies hier (vgl. Tab. 2) am Beispiel der Schwierigkeit einer Lernanforderung, genauer an dem Vergleich unterschiedlicher Schwierigkeitskonzepte mit dem menschlichen Verhalten (vgl. Krause, Gauger, 1997; Krause, 2003b).

Dargestellt sind die Befunde für Aufgabenpaare, deren erste Aufgabe theoretisch leichter ist. Außerdem haben diese Aufgabenpaare die Eigenschaft, dass sich ihre Wahrheitstabellen in genau einem Wertepaar unterscheiden und sonst nicht. Verwendet man in der Lernphase nur Items, in denen sich die zwei Aufgaben nicht unterscheiden, dann kann man nach Erreichen eines Lernkriteriums das verbleibende die Aufgaben trennende Item verwenden, um zu prüfen, welche Struktur erworben wurde. Dies ist in den Spalten für den Lerninhalt dargestellt. Der Unterschied ist deutlich, denn das Verhalten der neuronalen Netze spiegelt genau die Schwierigkeitsrangreihe wider, was

angesichts des Assoziationslernens dieser Netze, die ja kapazitativ nicht wirklich begrenzt sind, auch zu erwarten war. Deutlich der Unterschied zum menschlichen Lernen, das nicht dem Assoziationsprinzip folgt und damit offensichtlich weitergehende Strategien zur Lösung nutzt. Interessant in diesem Befund ist auch eine überraschend deutliche Ausbildung der XOR-Verknüpfung, die sich in anderen Literaturbefunden kaum zeigt. Im Sinne der Erklärungsansätze von Thornton (1996a, b) und Gauger (2002) kann dies in diesem Paradigma als Nutzung einer relationalen Merkmalsabhängigkeit erklärt werden, die in der Nutzung des abstrahierten Merkmals „Anzahl der auftretenden Merkmale“ bestehen könnte.

Verknüpfung	Häufigkeit der Wahl des Lerninhalts bzgl. des Testitems		Lernaufwand (mittlere Anzahl der benötigten Items)	
	Versuchspersonen	Netzwerke	Versuchspersonen	Netzwerke
<b>AND</b>	14	28	11,5	26,4
<b>EQUI</b>	14	0	10,2	-
<b>NAND</b>	4	28	9,7	56,5
<b>XOR</b>	24	0	11,4	-

Tab. 2: Vergleich der Lernleistungen von Probanden und neuronalen Netzen

In weiterführenden Untersuchungen hat Beyer (2001) an einem anderen Paradigma (Diagnoseparadigma) diese Einflüsse der Schwierigkeit auf das Lösungsverhalten untersucht. Einen zusammenfassenden Befund und Vergleich, der vier Stufen von Schwierigkeiten nahe legt, zeigt nachstehende Tabelle:

Niveaustufe (Level)	Netzwerke	Probanden
Level I	OR, A	AND, NOR
Level II	AND, $\sim A$	OR, A
Level III	NAND, NOR	NAND, $\sim A$
Level IV	EQUI, XOR	EQUI, XOR

Tab. 3: Darstellung der Schwierigkeitsstufen nach dem Lösungsverhalten bei Probanden und neuronalen Netzen (Felder mit unterschiedlicher Einfärbung kennzeichnen signifikante Unterschiede)

Auch hier wieder deutliche Unterschiede zwischen neuronalen Netzen und den Probanden, die hier aufgaben- und erfahrungsabhängig andere Unter-

schiede des Lösungsverhaltens und damit Grenzen des Assoziationslernens belegen.

### **3.3. Die Modellierung deduktiver Schlussprozesse**

Waren die bisherigen Betrachtungen dem Erkennen von Invarianten und damit dem induktiven Lernen gewidmet, soll nun versucht werden, den Modellierungsansatz auch für deduktive Schlussprozesse zu spezifizieren. Wir wollen dies am Beispiel der Syllogismen versuchen, für die z.B. der Modus Tollens nach wie vor eine Anforderung darstellt, deren Verhaltensvielfalt bisher nicht befriedigend erklärt werden kann. Zwar weiß man nach dem Erickson-Modell, dass unterschiedliches Verhalten in solchen Schlüssen sehr stark durch unterschiedliche Repräsentationen der Glieder entsteht, aber ein systematischer Beleg für diese Wirkungen im Schlussprozess steht aus. Auch die neueren Erklärungsansätze von Johnson-Laird und Savary (1999), die als mentales Modell einen Ansatz des *sentential reasoning* vorschlagen, hat genau an dieser Stelle seine Grenzen. Das Modell versucht Deduktionsprozesse naiver Personen zu kennzeichnen, die nicht im logischen Denken trainiert sind. Der Grundgedanke ist eine Repräsentationsannahme, die auf dem Wahrheitsprinzip beruht: „individuals tend to minimize the load on working ... not what is ... memory by representing explicitly only what is true, and not what is false“. Damit wird jede Klausel eines Syllogismus hinsichtlich seiner Wahrheit repräsentiert und aus deren Kombination die Konklusion erklärt. Doch auch die experimentellen Befunde, die dieses Modell stützen, sind nicht in der Lage, den Schlussprozess hinreichend nachzubilden. Barrouillet und Lecas (2000) formulierten genau für diesen Aufgabentyp (*illusory inferences*) einen tragfähigen alternativen Erklärungsansatz, der ein Missverständnis der disjunktiven Prämissen einschließt. (Johnson-Laird (2000) erwidert jedoch, dass auch bei disjunktiven Prämissen sein Modell richtig prädiziert.) Auch die Befunde von Kruschke (1993,1999) stützen den Ansatz von Johnson-Laird und Savary nicht, denn im Modell ALCOVE wird neben dem Gemeinsamkeitsprozess in der zweiten Stufe der Erkenntnis ein Differenzierungsprozess angenommen, der genau auf die differenzierenden Elemente Bezug nimmt.

Festzuhalten ist aber, dass alle Befunde die Wirkung der Repräsentation der Aufgaben auf den Schlussprozess belegen, aber kein Befund vorliegt, der aus dem gesicherten Vorliegen einer bestimmten Repräsentationsform den Deduktionsprozess zu prädizieren gestattet. Genau dies soll unser Anliegen in der Weiterführung dieser Forschungsrichtung unter Einbeziehung der Modellierungsmethoden sein:

- a. die experimentelle Prüfung des Untersuchungsmaterials hinsichtlich der individuellen Repräsentationsformen (dies entspricht weitgehend einer Wissensdiagnostik bei unseren Probanden), und
- b. der Vergleich von menschlichen und modellierten Prozessverläufen auf der Grundlage vergleichbaren Vorwissens. Dabei interessiert zusätzlich (vgl. auch 3.5), welche Verarbeitungsstrategie dem menschlichen Verhalten am besten entspricht. Es wird also um die erfahrungsabhängige interindividuelle Prozessanalyse des deduktiven Schließens gehen.

Hervorhebenswert ist in diesem Zusammenhang auch ein Ansatz von Geurts (2003), der das Denken mit Quantifikatoren, also den Prädikatenkalkül, betrifft und in dem syllogistisches Schließen als Spezialfall enthalten ist. Wesentlich ist hier die Unterscheidung zwischen traditioneller und moderner Logik, die sich auf die Integration der leeren Menge in die Klausen und damit Schlüsse bezieht, und der Nachweis, dass Schlüsse mit Kardinal-Quantifikatoren nicht mit der Theorie syllogistischen Schließens erklärbar sind und nur im Rahmen des Konzepts quantifizierten Schließens erklärt werden können. Und daraus folgt der Schluss, dass „syllogistic reasoning may benefit from semantical research on quantification“. Diese Erweiterung begründet Möglichkeiten, auch im Modellierungsansatz Generalisierungen experimentell prüfbar zu machen.

#### 3.4. Die Modellierung von Wahrscheinlichkeitslernen

Ein interessanter Erklärungsversuch dieser Lernprozesse liegt in der Betrachtung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der möglichen Reiz-Reaktions-Alternativen. In Anlehnung an die Betrachtungen von Thornton (1996 a, b) hat Gauger (2002) eine mögliche Reduktion des Diskriminationslernens auf diese Wahrscheinlichkeitsverhältnisse diskutiert und dabei dies als tragfähige Alternative zu den mentalen Modellen begründet.

Mit diesem Zugang stößt man auf eine aktuelle Diskussion, die fundamentale Schwierigkeiten im Rahmen des „probabilistic reasoning“ durch Gigerenzer u. Mitarb. (u.a. 1988, 1995, 2000, 2001) sowie Girotto und Gonzales (2001, 2002) aufzeigt:

- a. die Trennung zwischen „natural frequencies“ and „true probabilities“, die ein unterschiedliches Antwortverhalten bedingen (Gigerenzer);
- b. die Trennung zwischen „norm“ und „rule“, die sich vor allem im Kontextbezug unterscheiden und speziell das Auftreten von Fehlern im Denken erklären (Gigerenzer). „A norm relates to a specific class of situations, and it needs to be constructed and justified for these situations“;

- c. die weitergehende Differenzierung der Kontextwirkung (Präsentation), die dem Erklärungsansatz der „Frequentisten“ eine alternative Erklärung gegenüberstellt, der (bei der unterschiedlichen Aufgabenpräsentation beginnend) zu einem Modell der Relation zwischen Mengen und Teilmengen führt (Giroto und Gonzales). Letztere schließen, dass „number of chances express probability information and are not confused with natural frequencies“ und zeigen, dass „computational simplification is the more plausible explanation“ für das Antwortverhalten unter beiden Annahmen.

Mit einer Verbindung beider Ansätze, dem Diskriminationslernen und dem „probabilistic reasoning“ dürfte es interessant werden zu prüfen, ob die letzteren Diskrepanzen sich auch in diesem Lernparadigma so widerspiegeln und damit zur Differenzierung der bisherigen Erklärungsansätze beitragen können.

In diesem Kontext spielt noch ein weiterer Zugang eine Rolle, der bisher als Modellierungsansatz für psychologische Prozesse kaum genutzt wurde. Dies sind das Konzept unscharfer Mengen (fuzzy set) und die darauf aufbauenden Modelle (z.B. des unscharfen Klassifizierens), wie sie von Zadeh (1965) begründet wurden. Dies ist nicht nur wegen der direkten Beziehung zwischen den unscharfen Mengen und der mehrwertigen Logik interessant, sondern auch wegen der neueren Entwicklungen, die für eine Prozessmodellierung den Zugang über „fuzzy if-then rules“ entwickelt haben. Dubois und Prade (2003) diskutieren die Anwendungsbereiche dieses erweiterten Zugangs ausführlich und betonen, dass damit ein sehr fruchtbarer Zugang zur Wissensrepräsentation und Informationsverarbeitung begründet ist, der zur Differenzierung der Bedeutungen von Ähnlichkeit, Präferenz und Unsicherheit geeignet ist. Damit erschließt sich ein weiterer Aufgabenkreis, in dem durch Modellierungen Aussagen über Lernprozesse möglich und entscheidbar werden.

### **3.5. Die Nutzung unterschiedlicher Modelle zur Prüfung von Prozesshypothesen**

Ein letzter Gedanke, unsere zukünftige Forschung betreffend, ist die Nutzung unterschiedlicher Modelle zur Prüfung von Prozesshypothesen. Die Welt der informationstheoretisch begründeten Modelle ist sehr weit. Dazu gehören Modelle wie die neuronalen Netze, die Evolutionsstrategien, Genetische Algorithmen, Agentensysteme, aber auch mathematisch begründete Modelle wie Algorithmen und Grammatiken gehören dazu. Jede Modellklasse ist durch ihre besonderen Voraussetzungen und Eigenschaften ausgezeichnet.

Dies begründet die Frage danach, ob diese Unterschiedlichkeit nicht genutzt werden kann, um aus der vergleichenden Anwendung solcher Modelle, psychologische Prozess- oder Strategieannahmen prüfbar zu machen.

Als ein Beispiel kann die Modellierung von Taatgen und Anderson (2002) dienen, die versuchten das Erlernen der Vergangenheitsform (past tense) zu modellieren, da bisherige Erklärungsansätze unbefriedigend blieben. Unter Verwendung eines hybriden ACT-R Modells und eines neuronalen Netzes (NN) konnte der Erwerb regelmäßiger und unregelmäßiger Verbformen modelliert werden. Dabei zeigte sich, dass das ACT-R Modell mit weniger Annahmen auskommt, als das NN-Modell und darüber hinaus fähig ist, Aspekte des Spracherwerbs zu modellieren.

Auch die unter 3.1 angeführten Befunde ermöglichten es, durch Modellierungen mit neuronalen Netzen die Assoziationshypothese menschlichen Diskriminationslernens zu prüfen und, wie oben gezeigt, ihre Grenzen aufzuzeigen. Vergleichbar interessante Aussagen erwarten wir, wenn wir Modelle, die auf dem Zufallsprinzip basieren mit Modellen vergleichen, die ausgewähltes strategisches Verhalten realisieren. Hier öffnet sich ein weites Feld, das in Abhängigkeit von psychologischen Theorien und Erklärung erschlossen werden sollte.

#### **4. Themenbereiche zur Diskussion in der Leibniz-Sozietät**

Aus den Darstellungen begründet sich, dass für die Diskussion in der Leibniz-Sozietät Themenbereiche vorgestellt werden sollten, die der Interdisziplinarität und Expertise der Mitglieder entsprechen sollten und dabei einen Beitrag für eine in Diskussion befindliche Arbeitsgruppe „Theoretische Psychologie“ liefern können. Dazu gehören u.a.

- Beiträge zur Modellierung und Erklärung induktiven und deduktiven Denkens,
- Beiträge zur Erklärung/Differenzierung übergreifender Phänomeneigenschaften wie Komplexität, Schwierigkeit, Ähnlichkeit, ... die durch gezielte Modellanalysen im Vergleich zum menschlichen Verhalten ermöglicht werden,
- Beiträge zu Modellvergleichen und ihrer Bedeutung im Rahmen einer Theoretischen Psychologie.

## 5. Literatur

- Barrouillet, P. und Lecas, J.-F. (2000). Illusory inferences from a disjunction of conditionals : a new mental model account. *Cognition* 76, 167–173.
- Beyer, L. (2001). Komponenten der Nutzung und Ausbildung induktiven Wissens. Dissertationsschrift, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Bourne, L.E. (1974). An inference model for conceptual rule learning. In Solso, R.L. (Ed. ), *Theories in Cognitive Psychology: The Loyola Symposium* (pp. 231–255). Potomac, Maryland: L. Erlbaum Ass.
- Cattell, R.B. (1952). *Factor analysis*. New York: Harper & Bros.
- Clark, A. und Thornton, C. (1997). Trading spaces: Computation, representation, and the limits of uninformed learning. *Behavioral and Brain Sciences* 20, 57–90.
- Dörner, D. (1989). *Die Logik des Misslingens*. Rowohlt Verlag: Reinbek.
- Dörner, D. (2002). *Die Mechanik des Seelenwagens*. Verlag Hans Huber: Bern.
- Dubois, D. und Prade, H. (2003). Fuzzy set and possibility theory-based methods in artificial intelligence. *Artificial Intelligence* 148, 1–9.
- Erickson, J.R. (1974). A set analytic theory of behavior in formal syllogistic reasoning tasks. In: Solso, R. (ed). *Theories in cognitive psychology: The Loyola Symposium*. Lawrence Erlbaum Ass.: New Jersey.
- Erickson, J.R. (1978). Research in syllogistic reasoning. In: Revelin, R. und R.E. Meyer (eds.). *Human reasoning*, 39–50. John Wiley: New York.
- Estes, K.E., Campbell, J.A., Hatsopoulos, N. und Hurwitz, J.B. (1989). Base-rate effects in category learning: A comparison of parallel networks and memory storage-retrieval models. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 15, 556–571.
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig.
- Gauger, U. (2002). Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung von Lernprozessen mit neuronalen Netzwerken. Dissertationsschrift, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Geurts, B. (2003). Reasoning with quantifiers. *Cognition* 86, 223–251.
- Gigerenzer, G., Hall, W. und Blank, H. (1988). Presentation and content: the use of base rates as a continuous variable. *J. Exp. Psychol., Human Perception and Performance* 14, 513–525.
- Gigerenzer, G. (2000). *Adaptive thinking: rationality in the real world*. New York: Oxford University Press.
- Gigerenzer, G. (2001). Content-blind norms, no norms, or good norms? A reply to Vranas. *Cognition* 81, 93–103.
- Gigerenzer, G. und Hoffrage, U. (1995). How to improve Bayesian reasoning without instruction: frequency format. *Psychological Review* 102, 684–704.
- Giroto, V. und Gonzales, M. (2001). Solvive probabilistic and statistical problems: a matter of question form and information structure, *Cognition* 78, 247–276.

- Giroto, V. und Gonzales, M. (2002). Chances and frequencies in probabilistic reasoning: rejoinder to Hoffrage, Gigerenzer, Krauss, and Marrignon. *Cognition* 84, 353–359.
- Gluck, M.A. und Bower, G.H. (1988). From conditioning to category learning: An adaptive network model. *Journal of Experimental Psychology: General* 117, 227–247.
- Johnson-Laird, P.N. und Savary, F. (1999). Illusory inferences : a novel class of erroneous deductions. *Cognition* 71, 191–229.
- Johnson-Laird, P.N. (2000). Illusion and model: a reply to Barrouillet and Lecas. *Cognition* 76, 175-178.. *Cognition* 71, 191–229.
- Klix, F. und B. Krause (1969). Zur Definition des Begriffs „Struktur“, seiner Eigenschaften und Darstellungsmöglichkeiten in der Experimentalpsychologie. *Z. Psychol.* 176, 22–54.
- Klix, F. (1970). Neue Ergebnisse und Entwicklungstendenzen in der kybernetisch-psychologischen Erforschung kognitiver Prozesse. In: Klix, F. (Hrsg.) *Kybernetische Analysen geistiger Prozesse*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften: Berlin.
- Klix, F. (1976). Über Grundstrukturen und Funktionsprinzipien kognitiver Prozesse. In: Klix, F. (Hrsg.). *Psychologische Beiträge zur Analyse kognitiver Prozesse*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften: Berlin.
- Klix, F. (1980). General psychology and the investigation of cognitive processes. In: Klix, F. and Krause, B. (Eds.). *Psychological research*. Humboldt-University 1980. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften: Berlin.
- Klix, F. (1983). Organismische Informationsverarbeitung – Grundlage geistiger Leistungsfähigkeit. In: Scheel, H. und Lange, W. (Hrsg.) *Zur Bedeutung von Information für Individuum und Gesellschaft*. Leibniz-Tag der Akademie der Wissenschaften der DDR. 223–241.
- Klix, F. (1984). Über Wissensrepräsentation im menschlichen Gedächtnis. In: Klix, F. (Hrsg.) *Gedächtnis – Wissen – Wissensnutzung*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften: Berlin.
- Krause, B. (1977). Skalierungsmodelle in der Psychodiagnostik. *Z. Psychol.* 185, 257–287.
- Krause, B. und Metzler, P. (1978). Zur Anwendung der Inferenzstatistik in der psychologischen Forschung. *Z. Psychol.* 186, 244–267.
- Krause, B. und Raykov, T. (1989). Two approaches to measuring change in qualitative data and Wilder's „law of initial values“. *Z. Psychol.* 197, 121–128.
- Krause, B. (1990). Models for inductive reasoning. *Z. Psychol.* 198, 405–415.
- Krause, B. (1991). Experimentelle Beiträge zum kognitiven Lernen. in: *Experimentalpsychologie heute – 100 Jahre Zeitschrift für Psychologie*. *Z. Psychol. Suppl.* 11, 239–251.
- Krause, B. (1996). Towards a theory of cognitive learning. in: J. Brzesinski, B. Krause, T. Maruszewski (Hrsg.) *Idealization in Psychology*. Amsterdam.

- Krause, B. und Gauger, U. (1997). Learning and Use of Invariances: Experiments and Network Simulations. In Brzezinski, J., Krause, B. Maruszewski, T. (eds.), *Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and Humanities* (vol. 65, pp 195–214). Amsterdam: Rodopi.
- Krause, B. (1997). Towards a theory of cognitive learning. In Brzezinski, J., Krause, B. Maruszewski, T. (eds.), *Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and Humanities* (vol. 65, pp 177–194). Amsterdam: Rodopi.
- Metzler, P. und Krause, B. (1999). Methodischer Standard bei Studien zur Therapieevaluation. *MPR Online*, Bd.2.
- Krause, B. (2000). Entwicklungstendenzen mathematischer Methoden in der psychologischen Forschung. *Zeitschrift für Psychologie* 208, 357–384.
- Krause, B. (2001). Methoden der Beobachtung und Modellierung elementarer Lern- und Gedächtnisprozesse. In: Krause, B. (Hrsg.). *Ebbinghaus-Symposium. ZeE-Publikationen. Reihe: Wissenschaftliche Veranstaltungen. Band 1*. Berlin: ZeE.
- Krause, B. & Gauger, U. (1997). Learning and use of invariances: Experiments and network simulations. In: Brzezinski, J., Krause, B. & Maruszewski, T. (Eds). *Idealization in psychology*. Amsterdam: Rodopi.
- Krause, B. (2002). Veränderungsmessung und Interventionsevaluation. In: Meyer-Gramcko u.a. (Hrsg.). *38. BDP Kongress Verkehrspsychologie*.
- Krause, B. (2003). Methodische Grundlagen zur Evaluation verkehrspsychologischer Rehabilitation. In: Krause, B. und Metzler, P. (Hrsg.). *ZeE- Publikationen, Reihe „Empirische Evaluationsmethoden“, Band 6*. Berlin: ZeE.
- Krause, B. (2003). Erkennen diskreter Merkmalsstrukturen. Ein Beitrag zur Untersuchung und Modellierung menschlicher Lernprozesse. In: *Sitzungsberichte der Leibniz- Sozietät, Band 57*. Berlin: Trafo- Verlag.
- Krause, B. (2003). Schwierigkeit beim logischen Denken. In: Krause, B. und Krause, W. (Hrsg). *Psychologie im Kontext der Naturwissenschaften. Beiträge zur menschlichen Informationsverarbeitung – Festschrift für Friedhart Klix zum 75. Geburtstag. Ehrenkolloquium der Leibniz-Sozietät im November 2002 in Berlin. Abhandlungen der Leibniz-Sozietät*. Trafo-Verlag.
- Kruschke, J.K. (1992). ALCOVE: An exemplar-based connectionist model for category learning. *Psychological Review* 99, 22–44.
- Kruschke, J.K. (1993). Human category learning: Implications for backpropagation models. *Connection Science* 5, 3–36.
- Lachnit, H. (1994). Induktive versus assoziative Prozesse bei der Reizdiskrimination. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie* 41, 116–124.
- Pearce, J.M. (1997). *Animal learning and cognition*. Psychological Press: East Sussex, UK.
- Rescorla, R.A. und A.R. Wagner (1972). A theory of Pavlovian conditioning: Variations in the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement. In: Black, A.H. und W.F. Prokasy (eds.). *Classical conditioning H: Current research and theory*, 64-99. Appleton-Century-Crofts: New York.

- Roskam, E. E. (1983). Allgemeine Datentheorie. In: Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich Methodologie und Methoden, Serie Forschungsmethoden Band 3. Verlag für Psychologie – Dr. C. J. Hogrefe: Göttingen.
- Spearman, C. (1904). General intelligence, objectively determined and measured. *American Journal of Psychology* 15, 201–291.
- Taatgen, N. A. und Anderson, J. R. (2002). Why children learn to say „Broke“? A model of learning the past tense without feedback. *Cognition* 86, 123–155.
- Thornton, C. (1996a). Is transfer inductive?. CSPR 447. Sussex.
- Thornton, C. (1996b). Backpropagation can't do parity generalisation. CSPR 450. Sussex.
- Thurstone, L.L. (1947). *Multiple factor analysis*. Chicago: University Press.
- Überla, K. (1968). *Faktorenanalyse*. Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
- Weber, E. H. (1834). *De tactu*. Leipzig.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Inform. and Control* 8, 228–253.

Christian Bauer

## Sportler, ‚dopes‘ und Erythropoietin

*„Denn nichts auf Erden ist so nutzlos schlecht,  
Dass es der Erde nicht auch Gutes brächt,  
Und nichts so gut, dass es für falsche Ziele  
Missbraucht nicht in sein Gegenteil verfiel.“*

Romeo und Julia; II. Akt. 3. Szene,  
in der Übersetzung von Frank Günther

In seinem Eingangsmonolog zu dieser 3. Szene gibt Bruder Lorenzo in harmonischen Reimpaaren seiner Überzeugung Ausdruck, dass in einer (pflanzlichen) Arznei zwar viel Gutes steckt, dass sie aber, wenn sie in falscher Absicht gebraucht wird, sich in ihrer Wirkung verkehrt und ein schauderhaftes Gegenteil bewirken kann. Dies ist nun leider auch der Fall für das Hormon Erythropoietin (Epo), das als rekombinantes humanes Epo (rhEpo) auf dem Markt erhältlich ist und genau wie körpereigenes Epo zu einer Zunahme der Sauerstofftransportkapazität des Blutes führt. Dieser therapeutische Effekt von rhEpo wurde und wird vor allem bei Patienten ausgenützt, die an renaler Anämie leiden, einer „Blutarmut“, die regelmäßig beim chronischen Nierenversagen beobachtet wird.

Was Wunder, dass deshalb auch Hochleistungssportler zu diesem „magic hormone“ griffen, um dadurch die Sauerstofftransportkapazität ihres Blutes und damit die maximale Leistungsfähigkeit zu erhöhen (e.g. Gleckhill 1999; Ekblom 2000; Gundersen et al. 2001, Spivak 2001, Joyner 2003). Zwar hat das International Olympic Committee rhEpo, zusammen mit einigen anderen Peptidhormonen, bereits 1989 auf die rote Liste gesetzt (Kicman und Cowan, 1992; Mottvám 1999), dennoch wird rhEpo bis auf den heutigen Tag als „Blutdoping“ gebraucht oder besser gesagt, missbraucht.

Die „Erfolgsgeschichte“ dieses rekombinanten Hormons hat wichtige Zwischenschritte durchlaufen, und hier sind die wesentlichen Erkenntnisstufen:

1. Wie kam es überhaupt zur Identifizierung und gentechnischen Herstellung von Erythropoietin?
2. Was ist Epo – biochemisch gesehen?
3. Wie wird die Bildung von Erythropoietin normalerweise reguliert?
4. Warum ist die unkontrollierte Verabreichung von Erythropoietin im Sport so gefährlich?

### **Ad 1: Die Reise zur Entdeckung von Erythropoietin**

Lange bekannt ist die Tatsache, dass ein Höhengaufenthalt zu einer Vermehrung der roten Blutkörperchen führt, die deshalb rot sind, weil sie ein Protein enthalten, das Hämoglobin, welches Sauerstoff von der Lunge zu den Körpergeweben transportiert (Bert 1878, Viault 1890). Damit ergab sich die Frage, wie diese Verminderung des O<sub>2</sub>-Angebots in der „dünnen“, d.h. sauerstoffarmen Höhenluft zu einer Erythrozytenvermehrung führen kann (Miescher 1893). Nicht recht viel später stellte sich heraus, dass hier ein Botenstoff, also ein Hormon beteiligt ist, der aus dem Blutplasma von „blutarmen“ (anämischen) Kaninchen gewonnen werden kann und in normalen Empfängertieren eine Zunahme der Erythrozytenzahl bewirkt (Carnot et Deflandre, 1906). Die Autoren gaben diesem Hormon den zunächst eher unverbindlichen Namen Hämopoietin (zu griechisch: *haima* <Blut> und *poiein* <machen>). Erst viel später wurde der Name Erythropoietin (zu griechisch: *erytros* <rot> und *poiein* <machen> geprägt (Bonsdorff und Jalavisto 1948), der sich bis heute gehalten hat und der auf die spezifische Wirkung des Hormons auf die „roten“ Vorläuferzellen des Knochenmarks hinweist. Dennoch ergaben sich immer wieder Zweifel an der „humoralen“ Natur dieses Faktors, welche jedoch durch die bahnbrechenden Untersuchungen von Reissmann (1950) und kurze Zeit später von Erslev (1953) ausgeräumt wurden. Vor allem hatte Allan Erslev klarsichtig erkannt, dass Erythropoietin bei der Behandlung der Blutarmut beim chronischen Nierenversagen (renale Anämie) zukünftig von herausragender medizinischer Bedeutung sein würde, da sich bald herausstellte, dass Erythropoietin in der Niere gebildet wird (Erslev 1974).

Aber langwierig ist der Weg zwischen einer Hoffnung und deren Erfüllung; denn die Konzentration von Erythropoietin liegt im Blutserum nur im pikomolaren Bereich und ist somit nur äußerst schwer direkt nachweisbar.

Zur Veranschaulichung: Pikomolar bedeutet, dass sich ein Molekül Erythropoietin unter ca. 1000 Milliarden anderen Serum-Eiweißen „versteckt“ hält und eben deshalb so schwierig zu isolieren ist. Dieser riesigen Aufgabe hat sich ein Biochemiker aus Chicago, Eugene Goldwasser, unter-

zogen, der folgende glänzende Idee hatte: Er ging aus von der lange bekannten Tatsache, dass die Niere alle möglichen Substanzen konzentrieren kann, z.B. Elektrolyte und zum Teil auch Eiweiße. Es sollte also möglich sein, so die Schlussfolgerung, aus dem Urin von Patienten, die an einer aplastischen Anämie leiden und die durchwegs sehr hohe Konzentrationen von Erythropoietin im Serum aufweisen, das im Urin „angereicherte“ Erythropoietin „herausangeln“ zu können (Goldwasser und Kung 1968). In Zusammenarbeit mit T. Miyake und C. K. Kung gelang es Eugene Goldwasser schließlich, aus ca. 2550 Litern Urin ca. 10 mg reines Erythropoietin zu gewinnen (Miyake et al. 1977).

Von da an ging es Schlag auf Schlag: Erst wurde eine Mikrosequenzanalyse von Erythropoietin durchgeführt, das Gen identifiziert und die entsprechende cDNA in eine Säugetier-Zelllinie (CHO, Chinese Hamster Ovary cells) eingebaut, wodurch nun das so genannte rekombinante humane Erythropoietin (rhEpo) in beinahe beliebig großen Mengen gewonnen werden kann (e.g. Jelkmann 1992; Bunn and Poyton 1996). Dies ebnete den Weg für rhEPO zunächst bei der Behandlung der Anämie beim chronischen Nierenversagen (Winearls et al. 1986, Eschbach et al. 1987) und später auch bei einer Reihe von anderen Anämieformen (e.g. Macdougall 1999).

## Ad 2:Die Biochemie von Epo

Epo besteht aus einem Eiweiß- oder Peptidanteil mit einer relativen molekularen Masse von 18'235 Dalton, für endogenes als auch für rhEpo. Das Epo Molekül faltet sich in vier  $\alpha$ -Helices, die durch zwei Disulfid-Brücken stabilisiert werden (Cys<sup>7</sup>-Cys<sup>16</sup> und Cys<sup>29</sup>-Cys<sup>33</sup>). Diese beiden Disulfid-Brücken sind essentiell für die biologische Aktivität von Epo, das darüber hinaus noch komplexe Zuckeranteile trägt, wodurch sich die relative molekulare Masse auf 30'400 Da erhöht. Außer den Disulfidbrücken ist auch die vollständige Ausstattung von Epo mit den Kohlenhydrat-Seitenketten für die biologische Aktivität dieses Hormons erforderlich. Gibt es auch einen Unterschied zwischen endogenem und rhEpo? Ja, er beruht auf einem minimalen Unterschied im Anteil der sauren Endketten des Kohlehydratanteils, den Sialinsäuren, mit denen rhEpo weniger reichlich ausgestattet ist als endogenes Epo (Skibeli et al. 2001; Storrington et al. 2003). Ich werde darauf noch weiter unten eingehen, besonders im Zusammenhang mit dem Nachweis von rhEpo als „dope“.

### **Ad 3: Wie entsteht Erythropoietin und wie wird seine Bildung dem Bedarf angepasst?**

Epo wird vor allem in der Niere beim Erwachsenen und in der Leber beim Neugeborenen gebildet. Dies hängt damit zusammen, dass der wichtigste Stimulus für die Epo-Bildung ein Sauerstoffmangel ist.

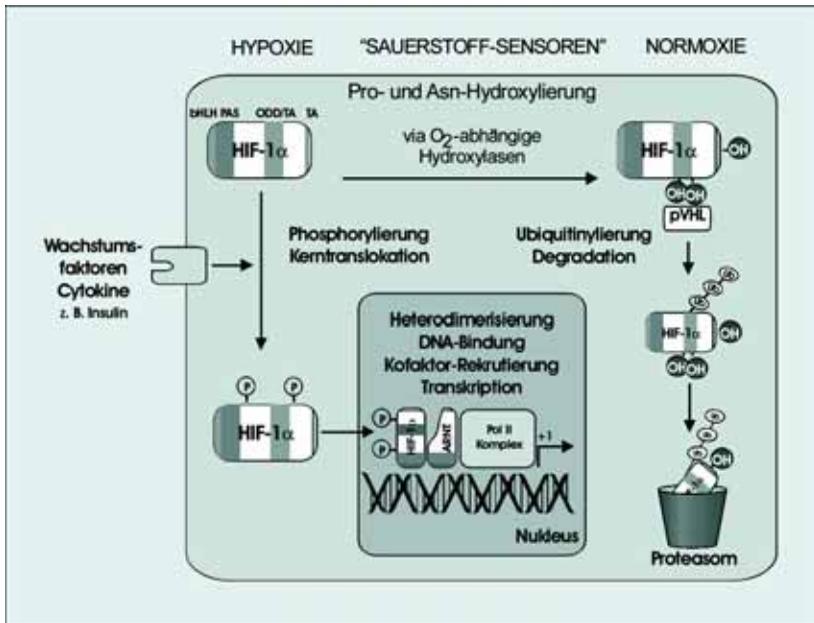
Niere und die Leber sind dafür gute Sensoren, weil in diesen Organen besonders hohe Gradienten für den Sauerstoffpartialdruck auftreten (e.g. Schurek und Johns, 1997; Jungermann und Kietzmann, 1997). Dies wiederum heisst, dass eine Verminderung des Sauerstoffangebots (Hypoxie) das „Sauerstoff-Mangel-Signal“ massiv verstärkt und zwar besonders in den Organen, die ohnehin schon hohe Sauerstoffgradienten aufweisen (Goldwasser 1996; Wenger 2002)

Der Sauerstoffmangel wird über nun sehr genau bekannte Mechanismen gemessen und in eine verstärkte Bildung von Epo übersetzt. Wie die biologische „O<sub>2</sub>-Elektrode“ exakt funktioniert, wurde kürzlich von der Arbeitsgruppe von Peter Ratcliffe in Oxford aufgeklärt (Epstein et al. 2001, Maxwell et al. 1999). Immer, wenn in einer Zelle ein Sauerstoffmangel „registriert“ wird, kommt es zur Anreicherung eines sog. Transkriptionsfaktors, dem Hypoxia-Inducible Factor, abgekürzt HIF, der das Erythropoietin-Gen tausendfach (!) aktivieren kann (Semenza 2001). Das sind erstaunliche Leistungen, wie sie in der Molekularbiologie ihresgleichen suchen.

Der eigentliche „O<sub>2</sub>-Sensor“ ist eine kleine molekulare Familie, die als „Prolylhydroxylasen“ bekannt sind. Sie empfangen Sauerstoff und übersetzen dieses „Signal“ in Hydroxylgruppen, die auf HIF übertragen werden: viele Hydroxylgruppen bei viel und nur wenige Hydroxylgruppen bei wenig O<sub>2</sub> (Wenger und Bauer, 2000).

Diese Besetzung von HIF mit Hydroxylgruppen verändert nun die Stabilität des Moleküls: viele Hydroxylgruppen führen zu einem beschleunigten Abbau von HIF und wenige erhöhen seine Stabilität. Deshalb steigt die Konzentration des Transkriptionsfaktors HIF bei niedrigem pO<sub>2</sub> und aktiviert das Epo-Gen.

Was ist die Wirkung von Epo? Es verhindert im Knochenmark ein eingebautes „Selbstmordprogramm“ (*Apoptose*) von Knochenmarkzellen, aus denen Erythrozyten entstehen. Diese sind prall gefüllt mit dem roten Blutfarbstoff (Hämoglobin), der Sauerstoff in der Lunge aufnimmt und an die sauerstoffhungrigen Körperzellen abgibt. Erythropoietin steigert die Bildung der Erythrozyten, indem es die entsprechenden Vorläuferzellen im Knochenmark vor dem programmierten Zelltod schützt (Koury und Bondurant, 1990).



aus: Wenger R.H. (2002): Cellular adaptation to hypoxia: O<sub>2</sub>-sensing protein hydroxylases, hypoxia-inducible transcription factors, and O<sub>2</sub>-regulated gene expression. *FASEB J*: 1151–1162

Das Resultat ist eine gewünschte Zunahme der Sauerstofftransportkapazität des Blutes, wie sie z.B. im Hochgebirge typisch ist. Dort erfolgt zwar eine geringere Beladung der Erythrozyten mit Sauerstoff, dieses Defizit wird aber über eine höhere Anzahl von Erythrozyten ausgeglichen, so dass der Sauerstoffgehalt des Blutes gleich bleibt. Da mehr Erythrozyten ein größeres Volumen einnehmen, entstand die Frage, ob Erythropoietin nicht nur durch Sauerstoffmangel, sondern auch durch das *Blutvolumen* reguliert wird? Das ist tatsächlich der Fall (Ehmke et al. 1995; Breyman et al. 2000; Roberts et al. 2000).

Dieser Zusammenhang ist wichtig für das pathophysiologische Verständnis der Nebenwirkungen von Erythropoietin, die bei nierenkranken Patienten beobachtet werden, welche sich einer „Ersatztherapie“ mit rhEpo unterziehen müssen.

Bei chronischem Nierenversagen ist die Bildung von endogenem Epo zu gering, um eine ausreichende Anzahl von Erythrozyten zu gewährleisten. Sie

muß durch das rekombinante Hormon ergänzt werden. Bisher wurde rhEpo bei mehr als zwei Millionen Patienten erfolgreich eingesetzt. Eine der häufigsten Nebenwirkungen dieser rhEpo-Therapie ist das Auftreten eines Bluthochdrucks. Er kann jedoch kontrolliert werden, wenn das rekombinante Hormon unter strenger ärztlicher Kontrolle verabreicht wird. Eine strenge ärztliche Kontrolle ist jedoch beim sogenannten Epo-Doping keineswegs gewährleistet, wodurch Leib und Leben von Sportlern in Gefahr geraten, die sich einem Epo-Doping unterziehen.

#### **Ad 4) Wie kann rhEpo nachgewiesen werden und warum ist „Epo-Doping“ überhaupt gefährlich?**

Vor allem in der Tagespresse wurde berichtet, dass bei Elite-Radfahrern Todesfälle nach Epo-Verabreichung beobachtet wurden. Diese Berichte wurden aufgegriffen und die Überprüfung ergab eindeutig, dass die unkontrollierte Gabe von rhEpo aus medizinischen Gründen gefährlich ist (e.g. Adamson und Vapner 1991; Gareau 1996; Zachee 1995; Lage et al. 2002, Shaskey 2000).

Wie schon oben dargelegt, wird rhEpo benützt, um die Erythrozytenzahl nach oben zu schrauben. Dies führt zu einer Zunahme der maximalen Sauerstoffaufnahme, der aeroben Leistungsschwelle und der Atemantwortkurve vor allem bei Ausdauersportlern (e.g. Ekblom 2000, Gledhill 1999). All diese Parameter sind auch entsprechend verändert beim so genannten Höhentraining (Stray-Gundersen et al. 2001, Ashenden et al. 2001).

rhEpo wurde deshalb vorrangig bei Athleten in Ausdauersportarten verwendet wie Marathon, Skilanglauf, Rudern und Radfahren eingesetzt. An dieser Stelle soll der Frage nachgegangen werden, warum rhEpo, das doch vom IOC auf die rote Liste gesetzt wurde, zumindest im Ausdauerradsport ziemlich problemlos erhalten und auch eingesetzt werden kann (e.g. Neue Zürcher Zeitung, 2000, Gareau et al. 1996; Adamson und Vapner 1991, Kazlaukas et al. 2002). Offensichtlich lassen sich auch die wohlmeinendsten ethischen Aufrufe nur durch Sanktionen wirkungsvoll durchsetzen. Um im Fall von rhEpo zu solchen Sanktionen zu gelangen, muss der „Sünder“ bei Verdacht überführt werden, d.h. rhEpo muss eindeutig *nachweisbar* sein.

Und genau das ist die Crux: rhEpo wird rekombinant gewonnen und ist deshalb von normalem, endogen gebildetem Epo kaum zu unterscheiden: Träfe das nicht zu, würde rhEpo von unserem Immunsystem erkannt und eine Antikörperproduktion gegen rhEpo wäre die Folge. Dass dies bei den vielen Mil-

lionen behandelten Patienten äusserst selten beobachtet wurde (Casadevall 2002), ist eben Ausdruck der Tatsache, dass unser Immunsystem, welches sonst kleinste molekulare Feinheiten erkennen kann, den Unterschied zwischen rhEpo und endogenem Epo nicht „bemerkt“. So behalf sich das IOC bis vor kurzem mit indirekten Hinweisen: „Verdächtig“ waren Sportler, deren Hämoglobinkonzentration oberhalb bestimmter Normwerte lagen (e.g. O’Toole 1999), wobei sich alle Beteiligten klar waren, dass dies ein sehr wenig beweiskräftiger Parameter ist (Schumacher et al. 2000). Es folgten dann Testverfahren, die auf einer rhEpo-induzierten Stimulation der Erythropoese beruhen. Messparameter sind dafür:

1. die Zahl und biochemische Ausstattung der allerjüngsten Erythrozyten, so genannten Retikulozyten. Die Anzahl dieser „Frühformen“ der Erythrozyten ist bei Zufuhr von rhEpo erhöht.
2. Der so genannte „lösliche“ Transferrinrezeptor. Transferrin ist die Transportform von Eisen, wenn dieses vom Magen-Darm-Kanal ins Blut gelangt, wird es an Transferrin gebunden ins Knochenmark transportiert. Im Knochenmark wird das mit Eisen beladene Transferrin an Transferrin-Rezeptoren der Vorläuferzellen von Erythrozyten gebunden, die Eisen zur Synthese von Hämoglobin benötigen. Bei einer rhEpo bewirkten Zunahme der Erythropoese verlieren die erythroiden Vorläuferzellen einen Teil ihrer Transferrin-Rezeptoren. Sie gelangen als lösliche Transferrinrezeptoren ins Blut und können dort nachgewiesen werden (Lippi et al. 2000, Parisotto et al. 2000 und 2001). Allerdings beträgt das „Zeitfenster“ dieses Markers nicht mehr als eine Woche (Birkeland et al. 2000). Jedoch ist eine erhöhte Konzentration des löslichen Transferrinrezeptors, zusammen mit anderen relativ leicht nachweisbaren hämatologischen Parametern, nicht beweisend für ein rhEpo-Doping (Lippi et al. 2000; Parisotto et al. 2000, Magnani et al. 1999, Kazlauskas 2002). So erschien es nur logisch, eine ‚smoking gun‘ zu identifizieren und dies ist tatsächlich gelungen.
3. Der Zuckeranteil von rhEpo als Markierungselement.

Der Nachweis erfolgt bei diesem Verfahren direkt und zwar über so „Seltsames“ wie den Zuckeranteil von rhEpo. Wie schon oben unter 2) ausgeführt, ist die Zuckerstruktur von endogenem und rhEpo etwas unterschiedlich, und genau darauf beruht der direkte Nachweis von rhEpo (Storring 2003; Gore et al. 2003; Sharpe et al. 2002; Lasne and de Ceaurriz 2000). Dieser Zusammenhang wurde auch vom Bundesamt für Sport, (Magglingen, Schweiz) eingehend gewürdigt. Entsprechende Stellungnahmen können unter: [www.dopinginfo.ch](http://www.dopinginfo.ch) in der jeweils aktualisierten Form abgerufen werden.

Aber auch für diese Nachweismethode muss leider ein enges Zeitfenster von ca. 3 Tagen berücksichtigt werden. Ziemlich lang für eine ‚smoking gun‘.

### **Über die Gefährlichkeit von Epo bei Hochleistungssportlern**

Warum ist Epo gefährlich, wenn es unkontrolliert gegeben wird? Es besteht der Verdacht, dass die Verabreichung von rhEpo bei „SpitzenradSPORTlern“ in den Niederlanden zu nicht näher aufgeklärten Todesfällen geführt hat. Über die möglichen Ursachen dieser Todesfälle ist keine einheitliche Meinung unter den Wissenschaftlern zu gewinnen, jedoch ist die Hypothese gut belegt, dass rhEpo, wenn es akut und in hohen Dosierungen verabreicht wird, zu einer gefährlichen Zunahme des Blutdrucks führt (e.g. Vaziri 2001, Akimoto et al. 2001, Roger et al. 1996).

In diesem Zusammenhang sind zwei mögliche Ursachen zu betrachten:

1. Indirekte Epo-Wirkung: der Blutdruck wird mit ansteigender Erythrozytenzahl durch eine Zunahme der Viskosität des Blutes erhöht. Dadurch nimmt der Reibungswiderstand an der Gefäßwand zu. Zusätzlich steigt die Hämoglobinkonzentration (Hb) des Blutes an. Durch die Zunahme des Hb wird auch Stickstoffmonoxid abgefangen, eine Verbindung, die normalerweise zu einer Gefäßerweiterung führt (Stamler et al. 1997, Chen et al. 2002).
2. Direkte Epo-Wirkung: der Blutdruck wird erhöht durch eine Zunahme der Wandspannung der peripheren Widerstandsgefäße (Arteriolen), die ihrerseits durch einen Epo-induzierten Einstrom von Kalzium in die Gefäßmuskulzellen ausgelöst wird (Schiffl und Lang, 1997, Akimoto et al. 2001). Des weiteren aktiviert rhEpo das Renin-Angiotensin-System wodurch der Blutdruck ebenfalls erhöht werden kann (Eggena et al. 1991)

Soweit zu den Mechanismen des Epo Dopings, die im Detail zwar noch einiger Aufklärung bedürfen, aber dennoch zu einer klaren Kernaussage führen. Kehren Sie zurück zum Titel dieses Beitrages und auch zu den sehr übersichtlichen Beiträgen von Gareau (1996), Shaskey (2000) oder Lage et al. (2002).

Ein „dope“ repräsentiert im umgangssprachlichen Englisch ein „Dummerchen“, eben einen „dope“, der trotz aller warnenden Zeichen unter allen Umständen gewinnen will und dabei seine Gesundheit opfert. Diese Mahnung geht an alle Hochleistungssportler: Vertrauen Sie vor allem auf sich selbst und nicht auf irgendwelche „dopes“.

**Literatur**

- Adamson J.W., Vapner D.: Recombinant erythropoietin to improve athletic performance (1991). *NEJM* 324: 698–699
- Akimoto T., Kusano E., Fujita N., Okada K., Saito O., Ono S., Ando Y., Homma S., Saito T., Asano Y. (2001): Erythropoietin modulates angiotensin II- or noradrenaline-induced  $\text{Ca}^{2+}$  mobilization in cultured rat vascular smooth-muscle cells. *Nephrol Dial Transplant* 16: 491–499
- Ashenden M.J., Hhn A.G., Martin D.T., Logan P., Parisotto R., Gore C.J. (2001): A comparison of the physiological response to simulated altitude exposure and r-HuEpo administration. *J of Sports Sci* 19: 831–837
- Bert P. (1878): *La Pression Barométrique. Recherches de Physiologie Expérimentale.* Librairie de L'Académie de Médecine, Paris
- Birkeland K.I., Stray-Gundersen J., Hemmersbach P., Hallen J., Haug E., Bahr R. (2000): Effect of rhEpo administration on serum levels of sTfR and cycling performance. *Med. & Sci in Sports & Exercise* 32: 1238–1243
- Bonsdorff, E., Jalavisto, E. (1948): A humoral mechanism in anoxic erythrocytosis. *Acta Physiol Scand* 16: 150–170
- Breyman C., Rohling R., Huch A., Huch R. (2000): Intraoperative endogenous erythropoietin levels and changes in intravascular blood volume in healthy humans. *Ann Hematol* 79: 183–186
- Bunn H.F., R. O. Poyton (1996): Oxygen sensing and molecular adaptation to hypoxia. *Physiol Rev* 76: 839–885.
- Carnot P. und Deflandre C. (1906). Sur l'activité hémopoétique des différents organes au cours de la régénération du sang. *CR Acad Sci Paris* 143: 432-435
- Carnot P., Deflandre C. (1906): Sur l'activité hémopoétique du serum au cours de la régénération du sang. *CR Acad Sci Paris* 143: 384–386
- Casadevall N. (2002): Antibodies against rHhEpo: Native and recombinant. *Nephrol Dial Transplant* 17: 42–47
- Chen Z., Zhang J., Stamler J.S. (2002): Identification of the enzymatic mechanisms of nitroglycerin bioactivation. *PNAS* 99: 8306–8311
- Eggena P., Willsey P., Jamgotchian N., Truckenbrod L., Hu M.S., Barrett J.D., Eggena M.P., Clegg K., Nakhoul F., Lee D.B.N. (1991): Influence of recombinant human erythropoietin on blood pressure and tissue renin-angiotensin systems. *Am J Physiol* 261 (Endocrinol. Metab. 24): E642–646
- Ehmke H., Just A., Eckardt K.-U., Persson P., Bauer C., Kirchheim H. (1995): Modulation of erythropoietin formation by changes in blood volume in conscious dogs. *J Physiol (London)* 488: 181–191
- Erslev A. (1953): Humoral regulation of red cell production. *Blood* 8: 349–357
- Erslev A. (1974): *In vitro* production of erythropoietin by kidneys perfused with a serum-free solution. *Blood* 44:77–85

- Eschbach J.W., Egrie J.C., Downing M.R., Browne J.K., Adamson J.W. (1987): Correction of anemia of end-stage renal disease with recombinant erythropoietin. *NEJM* 316: 73–78
- Epstein A.C.R., Gleadle J.M., McNeill L.A., Hewitson K.S., O'Rourke J., Mole D.R., Mukherji M., Metzen E., Wilson M.I., Dhanda A., Tian Y-M., Masson N., Hamilton D.L., Jaakkola P., Barstead R., Hodgkin J., Maxwell P.H., Pugh Ch.W., Schofield Ch. J., Ratcliffe P.J. (2001): *C. elegans* EGL-9 and Mammalian Homologs Define a Family of Dioxygenases that Regulate HIF by Prolyl Hydroxylation. *Cell* 107: 1–20
- Gareau R., Audran M., Baynes R.D., Flowers C.H., Duvallet A., Senécal L., Brisson G.R. (1996): Erythropoietin abuse in athletes. *Nature* 380: 113
- Gleckhill N., Warburton D., Jamnik V. (1999): Haemoglobin, blood volume, cardiac function and aerobic power. *Can J Appl Physiol* 24: 54–65
- Goldwasser E. (1996). Epo: a somewhat personal history. *Perspectives Bio Med* 40: 18–31
- Goldwasser E., Kung, CK (1968). Progress in the purification of erythropoietin. *Ann NY Acad Sci* 149: 49–53
- Gore C.J., Parisotto R., Ashenden M.J. Stray-Gundersen J., Sharpe K., Hopkins W., Emslie K.R., Howe C., Trout G.J., Kazlauskas R., Hahn A.G. (2003): Second-generation blood tests to detect erythropoietin abuse by athletes. *Haematologica* 88: 333–344
- Jelkmann W. (1992). Erythropoietin: structure, control of production and function. *Physiol Rev* 72: 449–489
- Joyner M.J. (2003):  $VO_2$ max, blood doping, and erythropoietin. *Brit J of Sports Med* 37: 190–191
- Jungermann K., Kietzmann Th. (1997). Role of oxygen in the zonation of carbohydrate metabolism and gene expression in liver. *Kidney Int* 51: 402–422
- Kazlauskas R., Howe C., Trout G. (2002): Strategies for rhEpo detection in sport. *Clinical Journal of Sport Medicine* 12: 229–235
- Koury M.J., Bondurant M.C. (1990). Erythropoietin retards DNA breakdown and prevents programmed death in erythroid progenitor cells. *Science* 248: 378–381.
- Lage J.M.M., Panizo C., Masdeu J., Rocha E.(2002): Cyclist's doping associated with cerebral sinus thrombosis. *Neurology* 58: 665
- Lasne F., de Ceaurriz J. (2000): Recombinant erythropoietin in urine. *Nature* 405: 635
- Lippi G., Guidi G. (2000): Laboratory screening for erythropoietin abuse in sport: an emerging challenge. *Clinical Chemistry & Laboratory Medicine* 38: 13–19
- MacDougall I.C. (1999): Optimizing erythropoietin therapy. *Current Opinion in Hematology* 6:121–126
- Magnani M., Corsi D., Bianchi M., Paiardini M., Galluzi L., Parisi A., Pigozzi F., (1999): Monitoring erythropoietin abuse in athletes. *Brit J Haematol* 106: 260–261

- Maxwell P.H., Wiesener M.S., Chang G.W., Clifford S.C., Vaux E.C., Cockman M.E., Wykoff C.C., Pugh C.W., Maher E.R., Ratcliffe P.J. (1999). The tumour suppressor protein VHL targets hypoxia-inducible factors for oxygen-dependent proteolysis. *Nature* 399: 271–275
- Miescher F. (1893). Ueber die Beziehung zwischen Meereshöhe und Beschaffenheit des Blutes. *Korrespondenz-Blatt Schweizer Aerzte* 23: 809–830
- Miyake T., Kung, C.K., Goldwasser E. (1977). Purification of human erythropoietin. *J Biol Chem* 252: 5558–5564
- Neue Zürcher Zeitung (NZZ): „Aus meiner Sicht gibt es nur ein Mittel, das nützt: EPO“: NZZ, 6. September 2000
- O'Toole M.L., Douglas P.S., Hiller W.D., Laird R.H. (1999): Hematocrits of triathletes: is monitoring useful? *Med & Sci in Sports & Exercise* 31: 372–377
- Parisotto R., Gore C.J., Hahn A.G., Ashenden M.J. Olds T.S., Martin D.T., Pyne D.B., Gawthorn K., Brugnara C. (2000): Reticulocyte parameters as potential discriminators of recombinant human erythropoietin abuse in elite athletes. *Int J of Sports Med* 21: 471–479
- Parisotto R., Wu M., Ashenden M.J., Emslie K.R., Gore C.J., Howe C., Kazlauskas R., Sharpe K., Trout G.J., Xie M. (2001): Detection of recombinant human erythropoietin abuse in athletes utilizing markers of altered erythropoiesis. *Haematologica* 86: 128–137
- Reissmann K. (1950): Studies on the mechanism of erythropoietic stimulation in parabiotic rats during hypoxia. *Blood* 5: 372–380
- Roberts D., Smith D.J., Donnelly S., Simard S. (2000): Plasma-volume contraction and exercise-induced hypoxaemia modulate erythropoietin production in healthy humans. *Clin Sci* 98 (1): 39–45
- Roger S.D., Fluck R.J., McMahon A.C., Raine A.E. (1996): Recombinant erythropoietin increases blood pressure in experimental hypertension and uraemia without change in vascular cytosolic calcium. *Nephron* 73(2): 212–218
- Schiffel H., Lang S.M. (1997): Hypertension induced by recombinant human erythropoietin (rHU-EPO) can be prevented by indomethacin. Pathogenetic role of cytosolic calcium. *Eur J of Med Res* 2(3): 97–100
- Schumacher Y.O., Grathwohl D., Barturen J.M., Wollenweber M., Heinrich L., Schmid A., Huber G., Keul J. (2000): Haemoglobin, haematocrit and red blood cell indices in elite cyclists. Are the control values for blood testing valid? *Int J Sports Med* 21: 380–385
- Schurek H-J., Johns O. (1997). Is tubuloglomerular feedback a tool to prevent nephron oxygen deficiency? *Kidney Int* 51: 386–392
- Semenza G.L. (2001). HIF-1, O<sub>2</sub>, and the 3 PHDs: How Animal Cells Signal Hypoxia to the Nucleus. *Cell* 107: 1–3
- Sharpe K., Hopkins W., Emslie K.R., Howe C., Trout G.J., Kazlauskas R., Ashenden M.J., Gore C.J., Parisotto R., Hahn A.G. (2002): Development of reference ranges

- in elite athletes for markers of altered erythropoiesis. *Haematologica* 87: 1248–1257
- Skibeli V., Nissen-Lie G., Torjesen P. (2001): Sugar profiling proves that human serum erythropoietin differs from recombinant human erythropoietin. *Blood* 98: 3626–3634
- Spivak J.L. (2001): Erythropoietin use and abuse: When physiology and pharmacology collide. *Advances in Exp Med & Biol* 502: 207–224
- Stamler J.S., Jia L., Eu J.P., McMahon T.J., Demchenko I.T., Bonaventura G.K., Piantadosi C.A. (1997). Blood flow regulation by S-nitrosohemoglobin in the physiological oxygen gradient. *Science* 272: 2034–2037
- Storring P.L., Yuen C.-T., Skibeli V., Nissen-Lie G., Torjesen P. (2003): Differences between the N-Glycans of human serum erythropoietin and recombinant human erythropoietin. *Blood* 101: 1204–1205
- Stray-Gundersen J., Chapman R.F., Levine B.D. (2001). „Living high-training low” altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *J Appl Physiol* 91: 1113–1120
- Vaziri N.D. (2001): Cardiovascular effects of erythropoietin and anemia correction. *Current Opinion in Nephrol and Hypertension* 10 (5): 633–637
- Viault F. (1890). Sur l’augmentation considérable du nombre des globules rouges dans le sang chez les habitants des hauts plateaux de l’Amérique du Sud. *CR Acad Sci Paris* 111: 917–918
- Wenger R.H. (2002): Cellular adaptation to hypoxia: O<sub>2</sub>-sensing protein hydroxylases, hypoxia-inducible transcription factors, and O<sub>2</sub>-regulated gene expression. *FASEB J*: 1151–1162
- Wenger R.H., Bauer C. (2000). Oxygen Sensing: „Hydroxy” Translates „Oxy”. *News Physio Sci* 15: 195–196
- Winearls C.G., Oliver D.O., Pippard M.J., Reid C., Downing M.R., Cotes P.M. (1986). Effect of human erythropoietin derived from recombinant DNA on the anaemia of patients maintained by chronic haemodialysis. *Lancet* II: 1175–1178
- Zachee P. (1995): Controversies in selection of epoetin dosages. *Issues and answers. Drugs* 49 (4): 536–554

Gisela Jacobasch

## **Eisen, das Damoklesschwert im Hochleistungssport**

*Gefährlich wird der Leichtsinns erst dadurch, dass der Leichtsinns nicht weiß, was Leichtsinns ist*

Lü Bu-we um 240 v. u. Z.

Eisen ist in geringen Mengen für nahezu alle Lebensprozesse essentiell. Es ist erforderlich für den Sauerstofftransport, die aerobe Energiegewinnung über die Atmungskette, die Zellteilung und damit für Wachstum, für zahlreiche Abwehr- und Entgiftungsreaktionen des Organismus und die Katalyse vieler Enzyme. Auf Grund der Fähigkeit von Eisenionen, mit koordinierenden Liganden Komplexe zu bilden, sind sie im wässrigen Milieu zur Elektronenübertragung befähigt. Daraus leitet sich die große biologische Bedeutung des Eisens ab, zugleich aber auch die Gefahr zur Bildung reaktiver Sauerstoffspezies, die stark toxisch sind. Zu ihnen zählt das Hydroxylradikal, das oxidative Schäden an Proteinen, Lipiden und Nukleinsäuren hervorrufen kann. Um die Elektronen übertragende Eigenschaft des Eisens biologisch effektiv nutzen zu können, mußten in der Evolution Schutzsysteme entwickelt werden, damit oxidative Zellschädigungen unter normalen Bedingungen verhindert werden. Zu diesen speziellen Schutzsystemen zählen die Peroxidasen, Superoxiddismutasen und Oxygenasen. Außerdem versucht der Organismus sich dadurch zu schützen, daß er Eisen ausschließlich gebunden an Eiweiß transportiert und speichert; die Folge davon ist, daß Eisen nicht über die Niere ausgeschieden werden kann. Von dem täglich aus dem Abbau gealterter roter Blutzellen anfallenden Eisen und dem Abbau anderer Proteine ergibt sich ein Umsatz von 24mg im Organismus, nur wenig geht verloren. Lediglich ein Defizit um 1mg Eisen resultiert aus abgeschilferten Zellen der Darmschleimhaut, Schweißverlust, abgeschnittenen Haaren, Finger- und Fußnägeln. Es besteht somit eine hohe Ökonomie des endogenen Eisenumsatzes, die durch Regulationsmechanismen so fein ausbalanciert wird, daß die intrazellulären Eisenspiegel gering gehalten werden.

Die Resorption von Eisen aus der aufgenommenen Nahrung erfolgt im proximalen Dünndarmabschnitt, dem Duodenum und oberen Jejunum. Die Regulation der intestinalen Eisenresorption ist in die Mechanismen, die die Eisenbalance kontrollieren, eingebunden. Dieses Wechselspiel wird bestimmt durch den Eisenstatus des Organismus, der repräsentiert wird durch die Eisenspeicher in der Leber, im retikuloendothelialen System und in den roten Blutzellen. Aus diesen Parametern leitet sich ab, wie groß die Rate der intestinalen Eisenresorption sein muß. Sie beträgt unter normalen Bedingungen für einen erwachsenen Mann etwa 1mg/Tag, etwas mehr für geschlechtsreife Frauen und das Doppelte für Schwangere. Die Resorptionsrate ist bei verschiedenen Erkrankungen, bei Sauerstoffmangel und bei Leistungssportlern variierbar ebenso bei Umgehung der Resorption z.B. durch Bluttransfusionen. Kurzzeitig können derartige Abweichungen durch einen unterschiedlichen Füllungszustand der Eisenspeicher ausgeglichen werden, lang anhaltende nicht. Die Folgen, die sich daraus ergeben, sind entweder ein Eisenmangel oder ein Eisenüberschuß. Wann sind diese Eisenimbilanzen behandlungsbedürftig? Am Beispiel des Eisenmangels möchte ich erläutern, warum die Antwort auf diese einfache Frage schwierig ist.

### **Eisenmangel**

Etwa 30% aller Menschen sind anämisch, bei rund einer Milliarde ist dafür ein Eisenmangel die Ursache. Berücksichtigt man noch den latenten Eisenmangel, d. h. ein Eisendefizit ohne Anämie, liegt die Zahl wahrscheinlich doppelt so hoch. Davon sind Frauen doppelt so oft betroffen wie Männer. An dieser Situation hat sich seit vielen tausend Jahren nichts geändert. Aus der umfangreichen Literatur, die über den Eisenmangel existiert, geht u.a. hervor, daß Eisenmangel die Resistenz für Infektionskrankheiten durch Beeinträchtigung der bakteriziden Eigenschaften der Leukozyten und der zellulären Immunabwehr herabsetzt (1). Eine Ursache dafür ist, daß das Schlüsselenzym der DNA-Synthese, die Ribonukleotidreduktase, Eisen abhängig ist und dadurch bei einem Eisenmangel die Proliferation der Leukozyten gehemmt wird (2). Trotzdem können offensichtlich Menschen mit Eisenmangel gegenüber gefährlichen Infektionskrankheiten Widerstand leisten. Der Schlüssel zu diesem scheinbaren Widerspruch liegt in den Wechselbeziehungen, die Mensch und Mikroorganismus bei einer Infektion eingehen (3). Das Wachstum und die Vermehrung von Bakterien, die einen Wirtsorganismus infiziert haben, wird durch die Verfügbarkeit von Eisen begrenzt. Aerobe Bakterien nutzen deshalb sogenannte Siderophoren, um Eisen vom Wirt zu erwerben. Diese binden Ei-

sen(III) der Wirtsproteine mit hoher Affinität und Spezifität in chelatartigen Komplexen. Diese Komplexe werden von den Bakterien aufgenommen. Intrazellulär wird das Eisen reduziert und zur Aktivierung Eisen regulierter Promotoren verwendet (4). Der Patient versucht, über mehrere Mechanismen, diesen Eisenentzug zu verhindern. Das gelingt ihm aber nur, wenn der Eisenbestand knapp ist. Vermutlich wurden deshalb intuitiv Aderlässe zur Therapie bei Infektionskrankheiten im Mittelalter vorgenommen. Aber erst in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde durch wissenschaftliche Studien belegt, daß bakterielle Infektionen bei Eisenmangel seltener auftreten (5,6). Trotzdem wurden bis Ende der 80er Jahre gezielte Studien zur Supplementierung von Eisen vorgenommen mit einem fatalen Ausgang für die Betroffenen, Flüchtlinge in Somali, Neugeborene und Kleinkinder in Polynesien und Neuguinea (7,8). Die Fälle an tödlicher Neugeborenenroseptikose stiegen bei den mit Eisen behandelten Säuglingen deutlich an, ebenso die Häufigkeit an Malariaerkrankungen bei Kleinkindern, sofern sie nicht an einer  $\alpha$ -Thalassämie litten (9). Auch die Erwachsenen erkrankten nach der Eisengabe signifikant häufiger an Infektionskrankheiten und die Manifestationen der Erkrankungen waren deutlich schwerer im Vergleich zu nicht behandelten Personen in der Studie. Eisengabe steigerte auch deutlich das Risiko für Hepatitis-B- und -C-Erkrankungen.

1988 wurden Ergebnisse zur Häufigkeit von Tumorerkrankungen in einer Langzeitstudie mit 14000 Erwachsenen publiziert (10,11). Sie zeigten, daß die Anzahl an Malignomen bei Personen mit einem hohen Eisenbestand größer war als bei Personen mit normalem oder vermindertem Eisenbestand.

Vor dem Einsatz der Antibiotika, d.h. vor Beendigung des 2. Weltkrieges, war die Pneumonie eine der häufigsten Todesursachen. An ihr starben in Deutschland ein Drittel weniger geschlechtsreife Frauen als Männer (2). Dieser Befund erklärt sich aus den wesentlich geringeren Eisenspeichern der Frauen im Vergleich zu denen der Männer. Statistisch belegbar ist weiterhin, daß Frauen länger leben und gegenüber Infektionskrankheiten widerstandsfähiger sind. Diese Beispiele verdeutlichen, wie gefährlich und schädlich eine Eisensupplementierung sein kann, wenn sie nicht auf dem Nachweis eines klinisch manifesten Eisenmangels basiert.

Eisen wirkt sich nur effektiv auf den Stoffwechsel aus, wenn sein erforderlicher Bestand in engen Grenzen konstant gehalten und die durch freies Eisen initiierte Bildung von toxisch wirkenden Radikalen verhindert wird. Die Natur hat deshalb in der Evolution einen enormen Aufwand getrieben, um die intestinale Eisenresorption durch ein ganzes System von Kontrollme-

chanismen exakt dem Bedarf anzupassen. Erst jetzt, mit der Aufklärung von genetischen Defekten von Proteinen, die an der Kontrolle des Resorptionsprozesses von Eisen beteiligt sind, beginnen wir diese Komplexität zu verstehen und zu bewundern.

### **Intestinale Eisenresorption und ihre Regulation**

Die Eisenresorption wird durch eine große Anzahl von Faktoren reguliert, die den Umfang der Eisenspeicher und die Erythropoese einschließen. Auf Grund der hohen inneren Eisenökonomie muß der erwachsene Mensch nur 1mg Eisen/Tag im Duodenum resorbieren, das entspricht etwa 10% der mit der Nahrung aufgenommenen Menge. In der Nahrung kann Eisen gebunden in Häm oder in ionischer Form auftreten. Der Resorptionsvorgang unterscheidet sich für beide Eisenquellen. Das ionische Eisen kann 2- und 3-wertig vorliegen. Resorbiert wird es an der luminalen Wand der Bürstensaumzellen nur in 2-wertiger Form. Die Reduktion des 3-wertigen Eisens erfolgt durch eine Membran gebundene Ferrireduktase (Dcytb), die ein Cytochrom-b-Enzym enthält. Das 2-wertige Eisen wird dann mit einem divalenten Metallionentransporter (DMT1), der auch Kupfer und Zink transportiert, über einen aktiven Protonen gekoppelten Mechanismus in die Enterozyten gepumpt (12). Hier kann es, gebunden an das Speichereiweiß Ferritin in Vesikeln aufbewahrt oder ans Plasma abgegeben werden. Der Transporter Ferroportin (auch Ireg1 genannt) transportiert das 2-wertige Eisen durch die basolaterale Membran (13). Um im Plasma an das Vehikel, Transferrin, gebunden zu werden, muß es wieder durch eine Membran gebundene Ferroxidase, Hephaestin, einem Ceruloplasminhomolog, oxidiert werden (14). Das nicht vom Organismus benötigte, in den Enterozyten gespeicherte Eisen, gelangt bei der Zellausschilferung in den Darm und wird mit dem Faeces ausgeschieden.

Häm wird durch einen spezifischen Rezeptor von den Enterozyten aufgenommen und intrazellulär das Eisen aus dem Häm durch eine Hämoxygenase freigesetzt. Der Transport ins Plasma verläuft analog wie für ionisches Eisen. Der Hämeisengehalt in der Nahrung variiert entsprechend der Ernährungsgewohnheiten. Im Allgemeinen konsumieren Australier und Amerikaner mehr rotes Fleisch als Europäer. Rotes Fleisch stimuliert die Aufnahme von Eisen in ionischer Form über einen noch nicht aufgeklärten Mechanismus.

Das im Körper vorhandene Transferrin kann insgesamt ca. 3mg Eisen binden; dieses wird täglich 10 mal ausgetauscht. Es transportiert sowohl intestinal resorbiertes als auch das bei der Mauserung der roten Blutzellen freigesetzte Eisen.

Ein weiteres Eisen bindendes Eiweiß ist Laktoferrin. Es tritt im Speichel, Vaginalschleim, Nasensekret, in der Seminal- und Tränenflüssigkeit, Galle sowie Milch auf. Es wird bei der Entzündung durch aktivierte neutrophile Leukozyten freigesetzt und spielt eine Rolle in der unspezifischen Immunantwort bei Infektionskrankheiten. Es wird vermutet, daß Laktoferrin durch eine Bindung an DNA die Transkription spezifischer Gene und damit das Immunsystem der Zelle beeinflussen kann (15).

Um Eisen aus dem Plasmatransferrin in die Zellen zu bringen, muß wieder eine Barriere überwunden werden. Das geschieht mit Hilfe von Transferrinrezeptoren (TfR), die sich an den Oberflächen der Zellen befinden. Sie binden das Eisen beladene Transferrin, nehmen es durch Endozytose auf und bringen es in eine Zellvakuole. In der Leberzelle wird Eisen an Ziträt, ATP, GTP, Inositolphosphate und andere Phosphatester gebunden. Das Eisen freie Transferrin wird aus der Zelle befördert und im Plasma wieder als Transporter eingesetzt. Der intrazellulär geschaffene, sehr geringe Eisenpool dient der Synthese Eisen enthaltender Proteine. Durch ein hohes Angebot kann der Eisenspiegel in den Zellen erhöht werden. Das Eisen wird dann an Ferritin gebunden und gespeichert. Ferritin nimmt 2-wertiges Eisen auf, oxidiert es und lagert es als unlösliches hydratisiertes Ferrioxid. Die Mobilisierung von Eisen aus der Speicherform erfolgt über einen Reduktionsschritt. Anschließend kann es über einen polaren und einen nicht polaren Kanal ins Plasma abgegeben werden.

Ferritin besteht aus 24 Untereinheiten (16). Im Inneren bildet es ein Eisen(III)-Hydroxidcor, um das sich bis zu 4500 Eisenatome/Mol fest einlagern können. Die Untereinheiten des Ferritins können H- (schwere) und L- (leichte) Polypeptidketten sein. Sie weisen 50% Aminosäureidentität auf. Der Anteil an H- und L-Ketten (H<sub>24</sub>/L<sub>0</sub> bis H<sub>0</sub>/L<sub>24</sub>) unterscheidet sich in den Ferritinen der einzelnen Organe und variiert auch bei verschiedenen Erkrankungen. Bei Eisenüberladung nimmt z. B. der Anteil der L-Ketten zu. Normalerweise sind Leber und Milz reicher an L-Ketten als Herz und Gehirn. Die H-Ketten verfügen über einen Metallbindungsort, an dem Eisen II zu Eisen III oxidiert werden kann. In Lysosomen kann Ferritin in das unlösliche Hämosiderin umgewandelt werden. Die Ferritine der Bakterien sind ausschließlich Homopolymere.

Auch die Transferrinrezeptorausstattung der Zellen unterscheidet sich (15). Zwei verschiedene TfRs sind bekannt. Die Hepatozyten und zirkulierenden Monozyten exprimieren TfR<sub>2</sub>, die erythroiden Zellen, Enterozyten u.a. Zellen TfR<sub>1</sub>. Entsprechend dem Eisenangebot wird die Synthese der TfRs und die der Ferritinuntereinheiten synchron reguliert. Das geschieht mit Hilfe

von „iron regulatory proteins“ (IRPs), die an sogenannte „iron response elements“ (IREs) in der mRNA binden, die entweder im 3` oder 5` nichttranslatierbaren (UTR) Bereich lokalisiert sind (17). In der mRNA des H-Ferritins liegt IRE in der 5`-UTR, in der TfR1 mRNA in der 3`UTR. Die IRPs üben auch Effekte auf die Synthese bestimmter Eisen enthaltender Enzyme aus. Dazu zählt u.a. das Schlüsselenzym der Hämoglobinsynthese, die erythroid-spezifische 5-Aminolävulinsäuresynthase, deren mRNA eine spezifische IRP-Sequenz in der 5`UTR-Region aufweist. Bindung von IRPs in der 5`UTR hemmt die Translation des Proteins. Bindung von IRPs an die 3`UTR blockiert den Nuklease vermittelten mRNA-Abbau und stabilisiert dadurch die mRNA, so daß die durch sie kodierten Proteine vermehrt gebildet werden können.

Zwei IRPs wurden identifiziert. IRP-1 verfügt über ein 4Fe-4S-Zentrum, diese Verbindung entspricht der zytologischen Akonitase. Geht eines der Eisenatome verloren, z. B. im Eisenmangel, erlischt die Enzymaktivität und es entsteht ein IRP mit hoher Affinität zur IRE-Bindungsstelle. IRP-2 hat keine Akonitaseaktivität. Dieses zytoplasmatische Protein wird, wenn der intrazelluläre Eisenspiegel hoch genug ist, proteolytisch abgebaut. Mutationen, die die IRPs inaktivieren, bewirken eine erhöhte Bildung von L-Ferritin-Ketten, was zu einem Anstieg des Plasmaferritinspiegels führt.

1996 wurde auf dem Chromosom 6p das Hämochromatose-Gen entdeckt. Es kodiert ein als HFE bezeichnetes Protein, das an der Kontrolle der Eisenresorption beteiligt ist (18). Es wird in den Epithelzellen des Duodenums und in den Kupfferschen Sternzellen der Leber exprimiert. HFE ist ein transmembranöses Glykoprotein, das eine Homologie zu MHC-Klasse I- Proteinen aufweist. Für die extrazellulären Schleifen des HFE-Proteins sind 2 Disulfidbrücken charakteristisch, durch die sich 3 Domänen unterscheiden lassen (a1, a2 und a3). An die a1-Domäne ist  $\beta$ 2-Mikroglobulin an der Zelloberfläche gebunden. HFE reagiert mit dem TfR1 in der Kryptenzelle der Mucosa des Duodenums. Über diese Wechselwirkung wird der Eisenstatus dieser Zellen moduliert und dadurch die Expression des luminalen und basolateralen Ionentransporters in den reifen Zellen im Bürstensaum kontrolliert. HFE hemmt die Eisenresorption dadurch, daß es die Affinität des TfR1 für Transferrin vermindert. Zwei Interpretationen werden für den Mechanismus favorisiert; entweder benötigt der HFE/TfR1-Eisentransferrinkomplex mehr Zeit für den Durchtritt durch die basolaterale Membran oder die Freisetzung von Eisen aus dem Transferrin ist verlangsamt. HFE reagiert dagegen nicht mit TfR2. Beide Proteine enthalten auch keine IREs, d.h. ihre Expression ist nicht vom zellulären Eisenspiegel abhängig. Im Eisenmangel werden DMT1,

Ferroportin und TfR1 in wenigen Stunden hochreguliert, während Ferritin herunter reguliert wird. Bei Eisenüberschuß verläuft die Regulation entgegengesetzt. Kontrollparameter ist der intrazelluläre Eisenspiegel; er bestimmt die Aktivität der IRPs. Die Kontrolle erfolgt in den Epithelzellen, die noch in der Krypte lokalisiert sind, da nur in ihnen das Expressionsmuster verändert werden kann. Sie wandern dann, ausgestattet mit den geforderten Resorptions-eigenschaften in die Bürstensaumregion des Duodenums. Die IRP-Aktivität ist aber noch in den Bürstensaumzellen durch das intestinale Eisenangebot variierbar.

In Makrophagen ist HFE an der Kontrolle des Eisenstatus beteiligt; denn HFE-Knockout-Mäuse sind für eine Eisenüberladung resistent.

Lange ist bekannt, daß die Erythropoeserate und auch der Sauerstoffmangel die Eisenresorption beeinflussen. Bei Hypoxie und Anämie wird die Expression von Ferroportin (Ireg1) und Dcytb gesteigert.

Ein Durchbruch zum Verständnis der Regulation des Eisenstoffwechsels gelang 2001 mit der Entdeckung eines aus 25 Aminosäuren bestehenden Peptids, genannt Hecpudin (19). Es wird in der Leber gebildet, kann ans Blut abgegeben und auf Grund des kleinen Molekulargewichtes auch über die Niere ausgeschieden werden. Hecpudin ist der lange gesuchte Sensor, über den die Leber die Eisenresorption, -Homöostase, -Speicherung, die Aktivität der erythroiden Stammzellen und Milzmakrophagen kontrolliert. Das Peptid hemmt die Eisenresorption im Duodenum, den Eisentransport durch die Plazenta und die Eisenfreisetzung aus Makrophagen (20). Die Hecpudin-Bildung wird durch die Aufnahme von Transferrin gebundenem Eisen durch TfR2 in den Hepatozyten bestimmt. Dafür spricht, dass ein TfR2-Defekt über eine verminderte Hecpudin-Sekretion die Eisenresorption erhöht. Deshalb bewirken sowohl TfR2- als auch Hecpudinmutationen eine erhöhte Eisenakkumulation im Organismus. An der Kontrolle der Hecpudin-Expression sind außer TfR2 auch TfR1 und HFE entsprechend der Konzentration des zirkulierenden Eisentransferrins beteiligt. Warum kann Hecpudin diese Prozesse kontrollieren? Hecpudin ist an dem gleichen Regulationsprozeß wie HFE beteiligt. Das Peptid wird wahrscheinlich für eine direkte Wechselwirkung mit dem HFE/ $\beta$ 2-Mikroglobulin/Transferrinrezeptor-Komplex benötigt. Außerdem ist Hecpudin für die Kontrolle der Eisenspeicher in Makrophagen erforderlich. Sein Ausfall vermindert ebenso wie der des HFE-Proteins den Eisenspiegel in Makrophagen trotz einer erhöhten intestinalen Eisenresorption. Für den Kontrollmechanismus ist wichtig, daß Eisen beladenes Transferrin an den TfR1 besser als an HFE bindet und der TfR1 wiederum besser als der TfR2 Eisentransferrin bindet. Bei Eisenmangel liegt nur eine geringe Menge an Eisentransferrin

im Plasma vor; deshalb wird mehr HFE an den Tfr1 gebunden. Gleichzeitig ist ein höherer Anteil des Tfr2 ungebunden. Beides signalisiert der Leber, die Bildung von Hefcidin zu vermindern. Daraus resultiert eine höhere Eisenresorption (21). Bei hoher Eisenbelastung dagegen ist auch der Eisentransferrinspiegel erhöht, so daß größere Mengen an freiem Eisen auftreten. Zusätzlich ist ein größerer Anteil des Tfr2 mit Eisentransferrin gesättigt. Unter diesen Bedingungen wird der Leber signalisiert, die Hefcidinbildung zu steigern. Diese Interpretation wird durch Ergebnisse mehrerer experimenteller Arbeiten unterstützt (22,23). Aus *in vitro* Experimenten läßt sich die Schlußfolgerung ableiten, daß die Expression von Hefcidin auch durch nicht an Transferrin gebundenes Eisen herunter reguliert werden kann.

Tritt im Hämochromatose-Gen eine Mutation auf, die zum Ausfall der Disulfidbrücke führt, so kann kein  $\beta$ 2-Mikroglobulin mehr gebunden werden und die Komplexbildung mit dem Tfr1 wird unmöglich. Diese Situation tritt bei der am häufigsten vorkommenden Mutation auf, bei der im HFE- Kodon 282 Cystein gegen Aspartat ausgetauscht ist (C282Y-Mutante) (18). Die Mutation bewirkt einen „Eisenmangel“ in der Darmepithelzelle. Das führt zu einer kompensatorischen Hochregulation des mukosalen DMT1- und des basolateralen Ferroportintransporters; denn beide mRNAs verfügen über IREs, DMT1 in der 3' UTR, Ferroportin in der 5' UTR. Die Hefcidinexpression in der Leber wird dabei gering gehalten (24).

Die Bedeutung der Leber für die Kontrolle der intestinalen Eisenresorption veranschaulichen auch Analysen bei Patienten mit Lebertransplantationen. Die Eisenakkumulation, die bei Patienten mit der hereditären HFE-Mutation induziert werden kann, ist vollständig aufhebbar durch die Implantation einer normalen Leber mit dem Wildtyp HFE. Umgekehrt resultiert bei Patienten mit dem Wildtyp HFE, die eine Leber von einem Menschen mit der C282Y-Mutation transplantiert bekommen, eine Eisenüberladung in der Leber (25).

## Eisen und Leistungssport

Seit der 19. Olympiade 1968 in Mexiko-Stadt wird gezielt versucht, den Höhenvorteil für das Leistungstraining zu nutzen. In der Sauerstoff ärmeren Höhenluft entsteht bei gleicher Trainingsintensität wie im Flachland ein größeres Sauerstoffdefizit, was eine verstärkte Neubildung roter Blutzellen bewirkt. Dabei steigt die Zellzahl über den Normwert an. Ein zweiter Effekt besteht darin, daß unter diesen Bedingungen die Erythrozyten einen größeren Anteil an Glukose über einen Nebenweg, den 2,3-Bisphosphoglyzeratweg, abbauen. Der Spiegel des 2,3 Bisphosphoglyzerates steigt dadurch an. Der

Metabolit ist zugleich ein Effektor der Sauerstoffsättigungskurve, deren sigmoiden Verlauf er nach rechts verschiebt (26). Dadurch wird eine größere Abgabe von Sauerstoff aus dem Hämoglobin an die Muskelzelle und andere Zellen bei relativ hohem Sauerstoffpartialdruck ermöglicht. Durch eine vermehrte Ausschüttung des Hormons Erythropoietin (siehe Beitrag C. Bauer in diesem Band) steigt die Anzahl der roten Blutzellen, und parallel dazu nimmt die Rate der Eisenaufnahme in die Knochenmarkzellen zu. Dazu wird die Anzahl der Transferrinrezeptoren auf der Oberfläche der Erythroblasten vermehrt. Dadurch erhöht sich die Rate der Transferrininternalisierung und damit die intrazelluläre Eisenakkumulation. Bei den dabei ablaufenden Signalübertragungen, spielen Phosphorylierungen, die von Isoenzymen der Proteinkinase-C (PK-C) katalysiert werden, eine wichtige Rolle (27,28). Die Differenzierung der Promonozyten im Knochenmark z.B. kontrolliert PKC- $\beta$ . Sie verfügt in der 5' UTR ihrer mRNA über eine IRE-Sequenz. Wird die PK-C- $\beta$  hochreguliert, arrestieren die Promonozyten in der G1/S-Phase des Zellzyklus (29). Ist ausreichend Eisen vorhanden, differenzieren sie zu Monozyten/Makrophagen; bei Eisenmangel dagegen unterliegen sie der Apoptose. Ein ausreichender Eisenspiegel ist auch für die Expression von Genen notwendig, die den Zellzyklus kontrollieren (30).

Doping bewirkt Kurz- und Langzeitschäden. Letztere resultieren aus einer verstärkten Eisenakkumulation im Organismus parallel zur Verringerung der Muskelmasse und des Blutvolumens nach Beendigung der aktiven Laufbahn als Sportler.

### **Oxidative Belastung und Eisenakkumulation bei Leistungssportlern**

Die meisten Sportarten erfordern von Leistungssportlern Schnelligkeit, Kraft und Ausdauer. Das Ziel des Trainings ist es deshalb, einen optimalen Energiestoffwechsel in der Skelett- und Herzmuskulatur zu erreichen. Dazu zählen: Zunahme der Muskulatur und Steigerung der Leistungsfähigkeit der Muskelfasern sowie der effektiven Bildung von chemisch verwertbarer Energie in Form von Adenosintriphosphat (ATP). ATP für den schnellen kurzzeitigen Energiebedarf wird aus der Glykolyse bereitgestellt. Vorbedingung dafür ist, daß die durch Insulin regulierte Glukoseaufnahme in die Muskelzelle gesteigert wird. Bei Ausdauersportarten überwiegt die aerobe mitochondriale Energiegewinnung über die Atmungskette. In ihr werden entsprechend dem Elektronenfluß durch die einzelnen Komplexe der Atmungskette, Protonen durch die innere Mitochondrienmembran transloziert. Die Protonen bewegende Kraft nutzt die ATP-Synthase zur ATP-Bildung. Dieser Schritt ist

begrenzend für die aerobe ATP-Gewinnung. Durch intensives Training kann erreicht werden, daß die Konzentration der ATP-Synthase in der inneren Mitochondrienmembran zunimmt und dadurch die Energiebereitstellung für den Muskelstoffwechsel ansteigt. In der Skelettmuskulatur wird durch intensives Training ein anderes PK-C Isoenzym als in den Promonozyten in seiner Aktivität verändert. Es ist die PK-C- $\zeta/\lambda$ , deren Aktivität im Skelettmuskel gesteigert wird. Untersuchungen von Biopsien der Beinmuskulatur vor, während und nach einer ergometrischen Belastung, ergaben bei Sportlern eine Translokation des Enzyms vom Zytosol an die Membranfraktion. Dieser Vorgang ist mit einer vierfachen Aktivierung der PK-C verbunden, die über längere Zeit erhalten bleibt. Interessant ist, daß dieser Effekt auch in dem ergometrisch nicht belasteten Bein auftritt (31). Dieser Befund deutet darauf hin, daß auch im Skelettmuskel PKC-Isoenzyme an der Signalübertragung beteiligt sind und durch Training deren Genexpression und Aktivierung verändert wird. Die Optimierung der Enzymausstattung in der Muskelzelle auf eine maximale Energiebereitstellung ist aber nur von Nutzen, wenn über den Blutweg ausreichende Mengen an Sauerstoff nachgeliefert und in der Muskelzelle freigesetzt werden.

Bisher zielen alle Maßnahmen im Leistungssport darauf ab, die Entwicklung eines Eisenmangels zu verhindern. Tatsächlich belegen mehrere Studien bei Läufern und Fußballern, daß durch intensives Training bei normaler Ernährung sich eine leichte Anämie entwickelt (32,33,34,35). Gezielte Untersuchungen mit markiertem  $^{59}\text{Fe}$  ergaben die erwartete erhöhte Eisenresorption und einen verminderten Eisenspeicher in der Leber im Vergleich zur Kontrollgruppe. In Ruhephasen unterschied sich die Eisenausscheidung mit dem Faeces nicht. Bei intensivem Training stieg sie dagegen durch Blutverluste von 5-6ml auf das 4-fache an.

Auf Grund dieser Befunde wurde eine Empfehlung ausgesprochen, bei Leistungssportlern die Eisenzufuhr bis über 100mg/Tag zu erhöhen, um Imbalancen zwischen Eisenresorption und Trainings bedingten Eisenverlusten auszugleichen (36).

Wenig untersucht wurde bisher der Effekt eines intensiven Trainings auf die zelluläre Eisenakkumulation. Bei intensivem Schwimmtraining steigt der Spiegel an freiem Eisen im Plasma an. Das kann als ein Ausdruck dafür gewertet werden, daß die Kontrolle über den Transferrin/Transferrinrezeptor-Mechanismus überfordert wird. Dafür spricht, daß nach einer mehrmonatigen Adaptationsphase an die körperliche Belastung sich die freie Eisenkonzentration im Plasma wieder durch einen verstärkten Influx von Eisen ins Stroma der Knochenmarkzellen verringert (37). Ob das über eine Hochregulation der

Transferrinrezeptoren oder über einen unspezifischen Mechanismus erfolgt, ist ungeklärt. Freies Eisen initiiert die Bildung von toxisch wirkenden Radikalen insbesondere durch den Angriff auf Phospholipide in den Zellmembranen, was strukturelle und funktionelle Veränderungen zur Folge hat. Sie können zu höheren unspezifischen Eisenaufnahmen führen. Dieser Vorgang wird von einigen Autoren als Schutzmechanismus gewertet, da er der Bildung reaktiver Sauerstoffspezies entgegenwirkt. Ein anderer Mechanismus besteht darin, einen schnelleren Abbau von Sauerstoffradikalen zu erreichen. Kontinuierliches Training steigert z.B. bei Marathonläufern die Ausstattung der roten Blutzellen an Superoxiddismutase. Dieses Enzym katalysiert zwei Dismutationsreaktionen, durch die aus dem Superoxidradikal Wasserstoffperoxid gebildet wird, das anschließend über die Glutathion abhängigen Oxydasen und Reduktasen zu Wasser umgesetzt wird. Diese experimentellen Befunde belegen, wie notwendig es ist, die Dauer und Intensität der körperlichen Belastung im Training so zu gestalten, daß die Konzentration an freiem Eisen im Plasma möglichst gering gehalten wird. Parameter zur Einschätzung der Bildung von Hydroxylradikalen und Lipidperoxiden sind der Aldehyd 4-Hydroxinonenal und Malondialdehyd (MDA). Die Konzentration beider Parameter steigt bei intensivem Training an. Parallel dazu erhöht sich die Konzentration an lose gebundenem Eisen in der belasteten Skelettmuskulatur. Dieser Effekt ist bei kontinuierlich trainierenden Sportlern schwächer als bei sporadisch trainierenden ausgeprägt. Letztere zeigen eine schwere oxidative Belastung des Organismus, da bei ihnen die reaktiven Sauerstoffspezies sowohl langsamer über die Leber weggeschafft als auch auf Grund höherer Konzentrationen an lose gebundenem und freiem Eisen verstärkt gebildet werden (38).

Besonders groß ist die Gefahr zur überhöhten Akkumulation von Eisen im Organismus bei Leistungssportlern nach der Beendigung ihrer Sportkarriere. Das Blutvolumen nimmt ab, ebenso die Muskelmasse. Damit werden aus dem Hämoglobin und Myoglobin große Mengen Eisen frei, die nicht ausgeschieden werden können. In Tab. 1 sind die Plasmaferritinspiegel von ehemaligen Leistungssportlern zusammengefaßt. Die Befunde verdeutlichen, daß erhöhte Ferritinspiegel nachweisbar sind, erwartungsgemäß häufiger bei Männern als bei Frauen, da letztere durch die Menstruation mehr Eisen verlieren. Die Ferritin-Konzentrationen lagen bei Sportlern, die einmal zum Olympiakader zählten, deutlich höher als bei denen, die nur an regionalen oder nationalen Wettkämpfen teilnahmen. Hervorzuheben ist, daß die Sportler, die regelmäßig Blut spendeten, keine pathologisch erhöhten Ferritinspiegel im Plasma aufwiesen. Keiner dieser Sportler war während des

Abtrainierens auf das Risiko einer möglichen Eisenakkumulation hingewiesen worden. In keinem Fall bestimmte der Sportarzt, der sie zuvor betreut hatte, nach dem Abtrainieren den Grad der Eisensättigung des Transferrins oder den Ferritinspiegel. Natürlich erfolgte es auch nicht durch den Hausarzt. Eigene Anfragen bei einem deutschen Olympiazentrum ergaben, daß das offensichtlich auch heute noch nicht der Fall ist. Das ist um so unverständlicher, da damit zu rechnen ist, daß z. B. in jeder Fußballmannschaft bei zwei Spielern ein Defekt im Hämochromatose-Gen vorliegt, der das Risiko zur Entwicklung der Eisenspeicherkrankheit erhöht. Die Konsequenzen, die aus einer Eisenbelastung des Organismus resultieren, lassen sich am besten am Beispiel der hereditären Hämochromatosen erläutern, obwohl die Kontrollmechanismen z.T. anders als die bei einem HFE-Defekt sind.

### **Primäre Hämochromatosen**

	<b>mutiertes Gen</b>	<b>Chromosom</b>
•	HFE1 HFE	6p21
•	HFE2 unbekannt (juvenil)	1q21
•	Hepcidin	19
•	unbekannt (neonatal)	3q23-24
•	HFE3 TfR-2	7q22
•	HFE4 Ferroportin	2q32
•	HFE5 L-Ferritin	19q13.1
•	H-Ferritin	11q13
•	Eisenakkumulationen bei Afrikanern	
•	Azäruoplasmin	3q23-24
•	Friedreich's Ataxie	9q13

### **Erworbene Hämochromatosen**

- Häufige Transfusionen
- Hochleistungssport

### **Sekundäre Hämochromatosen**

•	Thalassämien	11p15, 16p13.1
•	Pyruvatkinase	1q21-22
•	Glukose-6-phosphatdehydrogenase	Xq28
•	Glukose-6-phosphatisomerase u. a.	19cen-q12
•	<i>Sphärozytosen, Elliptozytosen</i> :	
•	$\alpha$ -Spektrin	1q22-25
•	$\beta$ -Spektrin	14q23-24,2
•	Bande 3	17q12-21 )
•	Glykophorin	2q14-21
•	Protein 4.1	1q34-36

Tab. 1: Klassifikation der Hämochromatosen

**Hämochromatosen**

	Ferritin ng/ml	+/- s	n
<b>Männer</b>			
Hochleistungssportler (Kugelstoßen, Rudern, Laufen)	553,8	165,6	6
Leistungssportler (Schwimmen, Laufen, Speerwerfen)	185,3	65,6	6
Kontrollen	77,0	41,0	50
<b>Frauen</b>			
Leistungssportler (Lauf)	104,0	53,4	6
Leistungssportler / Blutspender (Lauf, Volleyball)	46,0	21,9	6
Kontrollen	47,0	26,0	50

Tab. 2: Plasmaferritinspiegel von Sportlern 10 bis 20 Jahre nach Beendigung der aktiven Laufbahn

Krankheiten, die durch eine erhöhte Eisenspeicherung charakterisiert sind, werden unter der Bezeichnung Hämochromatose zusammengefaßt (Tab. 2). Sie bewirken pathologische Veränderungen zahlreicher Organfunktionen. Sie können primär bedingt sein durch eine erhöhte Eisenresorptionsrate oder sekundär durch eine gestörte Eisenumsetzung im Organismus. Dabei wird aus dem Abbau roter Blutzellen mehr Eisen freigesetzt als für die neue Synthese verwendet wird. Letzteres trifft z.B. für Anämien mit einer uneffektiven Erythropoese zu. Ist die Halbwertszeit der defekten roten Blutzellen stark verkürzt, bleibt ihre Zellzahl trotz eines Anstiegs der Neubildung bis zu zwei Größenordnungen unter der Norm. Der daraus resultierende Hypoxieeffekt steigert die intestinale Eisenresorption. Außerdem wird durch die vorzeitige Zerstörung der roten Blutzellen sehr viel Eisen freigesetzt. Dieses wird durch eine gesteigerte Synthese des Speicherproteins Ferritin vermehrt gebunden und über das Blut nicht nur ins Knochenmark sondern auch zu anderen Geweben transportiert, wo es abgelagert wird. Eine Therapie mit Bluttransfusionen verstärkt diesen Effekt dramatisch und begünstigt die Entwicklung lebensbedrohender Organschäden. Ist die sekundäre Hämochromatose noch kombiniert mit einer genetisch bedingten primären Hämochromatose, ist das

Ausmaß der pathologischen Folgen entsprechend verstärkt. Das Risiko dafür ist relativ hoch.

Die autosomal vererbare Hämochromatose wurde vor 150 Jahren zuerst von Troussou beschrieben (39). 80 Jahre später wurde vermutet, daß die Erkrankung auf eine erhöhte Eisenaufnahme zurückzuführen ist. 1976 erkannte man, daß das dafür verantwortliche Gen auf dem Chromosom 6 eng mit dem HLA-Locus (human leucocyte antigen) A4B14 gekoppelt ist (18,40). Das 1996 identifizierte Gen kodiert ein aus 343 Aminosäuren bestehendes Glykoprotein, von dem beim Processing 22 Aminosäuren abgespalten werden. Das HFE bildet mit  $\beta$ 2-Mikroglobulin Heterodimere. Dieser Komplex übt einen negativen Effekt auf die Eisenresorption aus. Fällt die HFE-Wirkung aus, kann eine verstärkte Eisenresorption resultieren.

Vor ca. 2000 Jahren entstand vermutlich bei den Kelten eine Punktmutation in der Nukleotidposition 845 durch einen Basenaustausch von Guanin gegen Adenin. Diese Veränderung hat zur Folge, daß bei der Translation statt Cystein die Aminosäure Tyrosin im Kodon 282 eingebaut wird. Die Mutante wird als C282Y bezeichnet. Sie kann durch den Verlust der schwefelhaltigen Aminosäure nicht mehr die Disulfidbrücke ausbilden, die für eine effektive Expression des HFE-Proteins und seine Lokalisation auf der Zelloberfläche notwendig ist. Das defekte Protein bleibt dadurch in der Zelle am endoplasmatischen Retikulum liegen und kann nicht mehr mit  $\beta$ 2-Mikroglobulin assoziieren. Der negative Modulationseffekt auf die intestinale Eisenresorption entfällt dadurch. Umfangreiche Studien ergaben, daß die C282Y-Mutante die häufigste Ursache der primären Hämochromatose ist. Unterschiede bestehen in der geographischen Prävalenz der Mutation. Nahezu 100% beträgt sie bei Patienten keltischgermanischer Abstammung und weißer Australier, 80% bei weißen USA-Bürgern. Für einige Mittelmeerländer werden 64% angegeben. Sehr viel seltener ist die C282Y-Mutante Ursache von primären Hämochromatosen bei Afrikanern, Indern, Chinesen, Japanern, den Ureinwohnern Australiens und Askhenasi-Juden (40,41,42,43,44). Als Ursache der Eisenüberladung bei Afrikanern wird ein Polymorphismus im Ferroportingen postuliert (45).

Der Anteil der heterozygoten Merkmalsträger für die C282Y-Mutante beträgt in Deutschland 15%! Das bedeutet, daß 0,5% der Bevölkerung homozygot sind. Nur wenige Homozygote entwickeln aber eine klinische Manifestation der Erkrankung, d.h. die Penetranz scheint relativ gering zu sein, wenn nicht zu viel Eisen aufgenommen wird. Aus diesem Grunde wird sogar ein Selektionsvorteil für geschlechtsreife Frauen zur Kompensation der Eisen-

verluste bei Schwangerschaften diskutiert, wie bei einem balancierten Polymorphismus. Eine Analyse über Konsequenzen, die sich aus einem HFE-Defekt bei Leistungssportlern während der aktiven Laufbahn ergeben, gibt es nicht.

In den letzten Jahren ist die Suche nach weiteren Gendefekten, die die Entwicklung einer Hämochromatose initiieren, fortgesetzt worden. Dabei wurde eine weitere Mutation im HFE-Gen festgestellt. Sie betrifft einen Basenaustausch im Nukleotid 187 von Cytosin gegen Guanin, der zu einem Wechsel des Aminosäureeinbaus im Kodon 63 von Histidin zu Aspartat führt. Die H63D-Mutante kann Heterodimere mit  $\beta$ 2-Mikroglobulin bilden, wird auch an der Zelloberfläche der Enterozyten exprimiert, kann aber nicht die Funktion des Wildtyps voll ausüben, so daß eine leicht erhöhte Eisenresorption resultiert. Daraus ergibt sich eine höhere Sättigung des Transferrinspiegels. Der Homozygotenanteil ist in der Bevölkerung wesentlich geringer als der für C282Y. Häufig treten aber compound Heterozygote für beide Mutationen des HFE-Gens auf. In einem Allel wurden beide HFE-Mutationen dagegen nicht gefunden. Inzwischen wurden weitere Mutationen und Polymorphismen im HFE-Gen nachgewiesen (S65C, I105T und G93R), deren klinische Bedeutung noch unklar ist (40,46,47).

Hämochromatose Typ2 ist eine seltene, aber sehr schwere Erkrankung, die bei Jugendlichen bereits nach dem ersten Lebensjahrzehnt manifest wird. Dieser juvenile Typ der Hämochromatose, HFE2, wird durch eine noch nicht identifizierte Mutation eines Gens im Bereich des Chromosoms 1q21 verursacht. Auch eine Mutation im Hpcidin-Gen (C70r) kann dem Krankheitsbild zu Grunde liegen. Die Eisenüberladung des Organismus tritt schneller und massiver als bei Trägern der C282Y-Mutante auf (48,49).

Ein Typ 3 der Hämochromatose (HFE3) ist mit noch nicht identifizierten Mutationen im Transferrinrezeptor-2-Gen (TfR 2) verbunden, das auf dem Chromosom 7q22 lokalisiert ist (50).

Hämochromatose Typ 4 (HFE4) ist im Gegensatz zu den vorher angeführten Krankheitsbildern, die alle autosomal rezessiv vererbt werden, durch einen autosomal dominanten Erbgang charakterisiert. Pietrangelo et. al. untersuchten eine große Familie, in der 53 Mitglieder eine Eisenüberladung aufwiesen. Ergebnisse von Mikrosatellitenanalysen schlossen eine Verbindung zum HFE-Gen aus (51). Dieser Typ der Eisenüberladung wird durch eine Mutation im Ferroportin-Gen verursacht, das auf dem Chromosom 2q32 lokalisiert ist. Der Defekt in diesem Protein bewirkt eine frühe Eisenakkumulation in Makrophagen und beeinträchtigt dadurch besonders die Immunabwehr.

Hämochromatose Typ 5 (HFE5) wird ebenfalls autosomal dominant vererbt. Die Ursache dieser Erkrankung ist eine Mutation in der 5' UTR-Region des H-Ferritin-Gens (52). Dem Hyperferritinämie-Kataraktsyndrom liegt eine Punktmutation in der hoch konservierten IRE-Sequenz im UTR-Bereich des L-Ferritin-Gens zugrunde. Dadurch erlischt die Möglichkeit, über die IRP-Bindung die Synthese von L-Ferritin herunter zu regulieren. Ferritin akkumuliert in den Zellen und bewirkt dadurch im Auge die Linsentrübung (53).

Azärolplasminämie: Ursache dieser seltenen Erkrankung ist eine Mutation im Zärolplasmingen, die eine Expression des Genproduktes unmöglich macht. Symptome dieser Erkrankung sind Diabetes und neurodegenerative Symptome. Der Ausfall dieses Proteins vermindert die Plasmaferroxidaseaktivität und zelluläre Freisetzung von Eisen. Dadurch wird eine fortschreitende Eisenakkumulation in der Leber, im Pankreas und im Gehirn gefördert (54).

### **Symptome der Eisenüberladung bei primären Hämochromatosen**

Frühe Symptome sind: Schmerzen an den Fingergelenken, Müdigkeit, Depression und ein gesteigertes Infektionsrisiko. Mit fortschreitender Erkrankung werden Leberveränderungen manifest. Zunächst entwickelt sich eine Fibrose, aus der später eine Zirrhose entstehen kann. Mit ihr steigt die Inzidenz für ein hepatozelluläres Karzinom.

Ablagerungen von Eisen in den Herzmuskelzellen sind die Ursache für das Auftreten von Kardiopathien, die zu Arrhythmien führen. Auch endokrine Funktionen werden durch zu viel Eisen beeinträchtigt. Charakteristisch dafür ist die Entwicklung von Diabetes und Hypogonadismus.

Welche Veränderungen und Symptome treten in den einzelnen Geweben auf?

#### ***Gelenke und Skelett***

Typische Symptome der Eisenüberladung sind Beschwerden im Bereich des 2. und 3. Mittelhandknochens. Zum Teil treten sie auch an den proximalen Zwischenhandgelenken auf. Außerdem besteht eine Neigung zu schmerzhafter Pseudogicht, einer Chondrokalzinose, die durch Ablagerungen von Kalziumpyrophosphat hervorgerufen wird. Sie kann sich als eine akute Entzündung der Gelenkkapsel manifestieren. Radiologisch sind Verschmälerungen der Gelenkspalte, Gelenknorpelverluste, Zysten und hakenförmige Osteophyten (umschriebene reaktive Knochenneubildungen, die vom Periost ausgehen) an den Köpfen der Mittelhandknochen festzustellen. Subartikuläre Zysten korrelieren mit den Orten der Eisenablagerung.

Die Arthritissymptomatik ist mit Aderlässen nicht zu beheben. Um das in den Zellen abgelagerte Eisen zu entfernen, ist der Einsatz von Chelatbildnern erforderlich, die das Eisen binden, so daß es als wasserlösliche Verbindung über die Niere ausgeschieden werden kann.

### ***Leber***

In der Leber wird Ferritin und Hämosiderin in den Hepatozyten abgelagert. Nur bei sekundären Hämochromatosen erfolgt die Eisenablagerung in den Kupfferschen Sternzellen. Die Eisenakkumulation resultiert daraus, daß die Rate der Eisenaufnahmen die der Eisenfreisetzung übersteigt. Wenn zuviel Eisen zu transportieren ist, reicht die Steigerung der Transferrinsättigung mit Eisen nicht aus, um alles zu binden, so daß ein nicht an Transferrin gebundener Überschuß auftritt. Die Hepatozyten nehmen dann Eisen aus beiden Quellen auf und speichern es. Ist Eisen im Ferritin sehr eng gepackt, wie es bei einer Überladung der Fall ist, treten Spuren an freiem Eisen auf, die reaktive Sauerstoffspezies bilden. Diese entkoppeln die oxidative Phosphorylierung, wodurch die Energiegewinnung uneffektiv wird. Außerdem fällt der reduzierte Glutathionspiegel als Ausdruck der oxidativen Belastung ab. Die in der normalen Leber „ruhenden“ Lipozyten (Itozellen) werden jetzt aktiviert; sie nehmen die Form von Myofibroblasten an und synthetisieren Kollagen und andere Matrixproteine.

Unspezifische abdominale Schmerzen und plötzlich auftretende Diarrhöen sind oft die ersten Symptome. Betroffene Personen sind auch empfindlicher für Alkohol bedingte Leberschäden. Häufig ist eine Lebervergrößerung nachweisbar, ohne daß die Transaminasewerte im Plasma erhöht sind. Die Leberschädigung nimmt in dem Maße zu, wie die bindegewebige Umwandlung der Leber zu einer Fibrose fortschreitet. Die Eisen induzierte Zirrhose, die nachfolgend auftritt, verursacht einen portalen Hochdruck mit entsprechenden Folgeschäden. Selbst in diesem fortgeschrittenen Krankheitszustand ist eine Therapie durch Aderlässe noch erfolgreich. Die schwerste Komplikation ist die Entwicklung eines hepatozellulären Karzinoms, das Risiko dafür wird durch massive Eisenablagerungen um das 200-fache erhöht.

### ***Herz***

Die kardiale Schädigung korreliert mit der Eisenmenge, die hauptsächlich im Myokard der Ventrikel und im Bereich des Reizleitungssystems zu finden ist. Sie führt zur Dilatation beider Ventrikel. Es treten gefährliche Rhythmusstörungen und Bradykardien auf. Die Blutansammlung nimmt im Herzen zu und führt zu seinem Versagen. Die Ausbildung einer Fibrose ist im Herzen sehr viel geringer als in anderen Organen.

### ***Endokrine Störungen***

Pankreas: Mit der Progression der Erkrankung entwickelt sich eine Störung der Glukosetoleranz bis zum Auftreten eines Diabetes Typ1 oder Typ2. Durch die toxische Wirkung des in den  $\beta$ -Zellen des Pankreas abgelagerten Eisens wird die Insulinsynthese vermindert. Außerdem entwickelt sich auf Grund der Schädigung der Hepatozyten eine Insulinresistenz. Es wird vermutet, daß Chrommangel bei der Manifestation des Diabetes eine Rolle spielt. Er ist darauf zurück zu führen, daß bei hoher Eisenresorption Chrom durch Eisen vom Transferrin verdrängt wird. Der Hyperferritinidiabetes läßt sich durch Chelatbildner besser als durch Phlebotomie behandeln.

Hypophyse: Eisen induzierte Schädigung der Hypophyse hemmt die Freisetzung von FSH (Follikel stimulierendes Hormon) und LH (Luteinisierendes Hormon), was zur Ausbildung eines hypogonadotropen Hypogonadismus führt, der häufig übersehen wird. Er kann sowohl bei Frauen als auch Männern vorkommen. Symptome sind bei Frauen Infertilität, Amenorrhoe und eine vorzeitig einsetzende Menopause, bei Männern Sterilität, bilaterale testinale Atrophie und Impotenz.

Als Folge der Hypophysenschädigung kann sich auch eine Osteoporose entwickeln. Häufiger als normal ist ein Hypothyroidismus zu beobachten. Er resultiert aus einer Fibrose der Schilddrüse und der Wirkung von Thyroidantikörpern.

### ***Hämatologie***

Eisenüberladung kann paradoxer Weise auch zu einer Anämie führen, wenn das Eisen in die Knochenmarkzellen nicht aufgenommen werden kann. Dieser Befund wird oft in der Diagnostik nicht berücksichtigt. Diese Anämie wird aufgehoben, wenn das überschüssige Eisen aus dem Organismus entfernt wird. Knochenmarkuntersuchungen haben wenig Aussagegewert, da die Eisenablagerung im Knochenmark nur wenig mit dem Gesamtbestand im Organismus korreliert.

### ***Haut***

Hautveränderungen sind späte Symptome. Sie eignen sich deshalb nicht zur Diagnostik der Erkrankung. Die Eisenüberladung ruft an Licht exponierten Stellen eine metallisch graue bis Bronze-farbige Tönung der Haut wie bei Färbern hervor. Sie werden durch direkte Hämosiderinablagerungen in der Haut verursacht. Dadurch wird eine Eisen induzierte Stimulation der Melanozyten bewirkt. Außerdem nimmt die Photosensitivität mit der Eisenakkumu-

lation in der Haut zu. Ein Haarausfall ist besonders in den Achselhöhlen, im Brust- und Genitalbereich sowie an den Brauen auffällig.

### ***Neuropsychiatrische Symptomatik***

Plötzlich auftretende Depressionen, die nicht dem persönlichen Charakterbild entsprechen, sind typisch. Auch eine milde Demenz kann sich als Folge der Eisenablagerung im Gehirn entwickeln. Ein neuropeptidähnliches Verteilungsmuster von Transferrinrezeptoren läßt vermuten, daß Transferrin eine modulierende Funktion in Gehirnzellen ausübt. Periphere Neuropathien und Tinnitus (Ohrgeräusche) können ebenfalls durch eine Eisenüberladung verursacht werden

### ***Infektionen und Tumorgenese***

Eisenüberladung begünstigt eine Reihe von Infektionen (3). Dazu zählen u.a. Hepatitis B und C, Malaria und HIV. Auch das Risiko für gastrointestinale Infektionen z.B. durch *Yersinia enterocolitica* oder *Vibrio vulnificus* ist erhöht. Ein Mangel an neutrophilem Lactoferrin steigert das Risiko sowohl für gram-negative als auch gram-positive bakterielle Infektionen und Pilzkrankungen. Außer dem Risiko für ein hepatozelluläres Karzinom steigt auch das für kolorektale Karzinome und hämatologische Tumorerkrankungen.

### ***Diagnostik***

Ein wichtiger Parameter in der Diagnostik ist die Transferrinsättigung mit Eisen. 98% aller HFE-Patienten haben Werte >45%. Der Anstieg der Transferrinsättigung ist ein frühes Symptom, das auf eine Akkumulation größerer Eisenmengen hinweist. Im fortgeschrittenen Stadium reflektiert der Ferritinspiegel im Plasma exakter das Krankheitsbild. Der Verdacht auf eine Hämochromatose besteht, wenn die Ferritinkonzentration Werte >200-300ng/ml erreicht (40). Differentialdiagnostisch sind andere Ursachen einer Hyperferritinämie auszuschließen. Es ist zu erwarten, daß zukünftig die Bestimmung des Hepcidinspiegels im Plasma für die Diagnostik an Bedeutung gewinnt.

Eine Abschätzung der Eisenspeicher in den Organen kann mit invasiven und nicht invasiven Methoden vorgenommen werden. Besonders empfindliche Bestimmungen lassen sich mit der „Superconducting quantum interference device“- (SQUID) Methode durchführen (55). Bei Bilanzmessungen wird der Eisengehalt entnommener Blutproben mit der resorbierten Eisenmenge verglichen. Wenn 2,4 g Eisen durch die Abnahme von 12x500ml Blut innerhalb von 3 Wochen entfernt werden, ohne einen Eisenmangel hervorgerufen, liegt eine Eisenüberladung des Organismus vor.

Leberbiopsien liefern nur Informationen über den Fettgehalt, die Eisenverteilung und den Grad der Zirrhose. Aus dem Eisenindex (Quotient aus mikromol Eisen/g Leber und Patientenalter) läßt sich die Eisenakkumulationsrate bewerten. Als diagnostischer Wert gilt ein Eisenindex  $>1,9$  (56). Dabei ist aber zu beachten, daß der Lebereisengehalt nicht gut mit dem Alter korreliert. Jede Verdachtsdiagnose ist deshalb durch eine genetische Analyse zu bestätigen. Oft reicht der Nachweis einer C282Y Mutation, die in ca. 90% der Fälle die Krankheit hervorruft.

### ***Prognose und Therapie***

Wie keine andere Erkrankung ist die primäre Hämochromatose und die durch den Leistungssport provozierte Eisenüberladung durch Prävention vollständig zu verhindern, wenn die Behandlung im präsymptomatischen Stadium einsetzt. Das Ziel der Therapie besteht darin, die zu großen Eisenspeicher so rasch wie möglich zu entleeren, um Organschäden zu minimieren. Das geschieht durch Phlebotomie. 500 ml Blut werden je nach Dringlichkeit 1-2 mal pro Woche abgenommen (der erwachsene Mensch toleriert 4-5 Aderlässe/Woche, ehe er anämisch wird). Mit 500 ml Blut werden in Abhängigkeit vom Hämoglobingehalt 200-250 mg Eisen entfernt. Das Knochenmark gleicht den Blutverlust durch eine Steigerung der Erythropoese wieder aus und nutzt dafür das Eisen aus den Gewebespeichern. Es ist zu empfehlen, durch die Blutentnahmen einen Ferritinspiegel im Plasma von  $<10\text{ng/ml}$  einzustellen. Anhand der MCV-Werte (mittleres korpuskuläres Volumen der roten Blutzellen) läßt sich ableiten, wie groß der Anteil junger, neu gebildeter roter Blutzellen ist; denn diese sind größer als die alten. Außerdem zeigt der MCV-Wert auch an, ob für die Hämoglobinsynthese ausreichend Eisen zur Verfügung steht. Ist das nicht der Fall, sinken die Werte unter den Normbereich ab. Ist durch die Blutentnahmen der angestrebte Ferritinspiegel erreicht, genügt bei Patienten eine Erhaltungstherapie mit 2 Aderlässen pro Monat, die lebenslanglich beizubehalten ist. Bei Sportlern kann zu diesem Zeitpunkt die Therapie beendet werden, sofern sie nicht Träger eines HFE-Defektes sind.

Alkohol ist wegen seiner Lebertoxizität von HFE-Patienten und Sportlern zu meiden. Zurückhaltung ist auch bei Nahrungsmitteln zu empfehlen, die reich an Eisen und Ascorbinsäure sind.

Eine Alternative zur Phlebotomie ist die Eisenchelationstherapie mit Deferoxamin, Deferipron und/oder ICL670 (40,57). Das gebundene Eisen kann bei dieser Therapie über die Niere ausgeschieden werden. Diese Methode ist jedoch weniger effizient, nicht frei von Nebenwirkungen, körperlich belastend und teuer. Sie wird vorrangig zur Therapie von sekundären Hämochrom-

atosen eingesetzt, wo die Grunderkrankung Aderlässe ausschließt. Bei primären Hämochromatosen wird auf Chelatbildner nur bei spezifischen Symptomen zurück gegriffen.

Die Folgen der Eisenüberladung, die aus dem Leistungssport resultieren, wurden bisher unterschätzt, obwohl bei ihnen die hohe Infektanfälligkeit dafür ein Indiz ist. Trainingsmethoden, stark gesteigerte Eisenzufuhr und Doping haben in den letzten Jahrzehnten die Gefahr der Eisenüberladung bei Leistungssportlern stark erhöht. Besonders groß ist die Gefahr nach Beendigung der aktiven Laufbahn. Zu diesem Zeitpunkt werden die Sportler nicht mehr von Sportärzten betreut. Auf Grund der weit verbreiteten Unkenntnis über den Eisenstoffwechsel werden Leistungssportler auch nicht durch ihre Hausärzte dazu angehalten, das Ausmaß der Eisenüberladung kontrollieren oder entsprechend behandeln zu lassen. Es ist zu vermuten, daß die hohe Anzahl von Herzinfarkten bei ehemaligen Leistungssportlern in relativ jungen Jahren darin ihre Ursache hat. Rechtzeitig vorgenommene Aderlässe hätten das wahrscheinlich verhindern können. Aus epidemiologischen Untersuchungen in Finnland und in den Niederlanden läßt sich belegen, daß ein erhöhter Eisengehalt im Organismus das Risiko für Herzinfarkte steigert. Blutspender dagegen haben ein vermindertes Risiko für koronare Herzerkrankungen (58,59). Nicht Transferrin gebundenes Eisen (NTBI) kann durch die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies die „low density Lipoproteins“ (LDL) leichter oxidieren und dadurch zur Entwicklung der Arteriosklerose beitragen (60). Diese Befunde unterstützen die mehr als 20 Jahre alte Hypothese, die besagt, daß die höhere Inzidenz und Mortalität koronarer Herzerkrankungen bei Männern im Zusammenhang mit Unterschieden in den Eisenspeichern beider Geschlechter steht (61).

Auf Grund der Häufigkeit des Auftretens der C282Y-Mutation im HFE-Gen ist zu fordern, Spitzensportler auf das Vorliegen des Defektes zu screenen. Im positiven Fall ist die Eisenzufuhr individuell anzupassen und eine entsprechende Nachsorge nach Beendigung des Leistungssportes vorzunehmen, um eine pathologische Eisenakkumulation zu verhindern.

Es ist notwendig, aus dem bekannten Wissen Konsequenzen zu ziehen.

## **Literatur**

1. Brock, J. H.: Iron and Immunity. *J .Nutr. Immunol.* 2(1993), 47–106  
Brock, J.H.; Mulero, V.: Cellular and molecular aspects of iron in immune function. *Pro. Nutr. Soc.* 59(2000), 537–540

2. Betke, K.: Balancierter Polymorphismus bei Blutanomalien. *Nova acta Leopoldina NF65,277(1991)*, 151–161
3. Weinberg, E.D.: The iron-withholding defence system. *Am. Soc. Microbiol. News* 59(1993), 559–562
4. Escolar, L.; Perez-Martin, J.; De Lorenzo, V.: Opening the iron box: Transcriptional metalloregulation by the Fur protein. *J. Bacterol.* 181(1999), 6223–6229
5. Masawe, A. E. J.; Muindi, J.M.; Swal, G. B. K.: Infection in iron deficiency and other types of anaemia in the tropics. *Lancet II* (1974), 314–317
6. Pinchmann, M.; Ganzoni, A. M.: Increased resistance to iron deficient mice to *Salmonella* infection. *Infect. Immun.* 17(1977),663
7. Murray, M. J.; Murray A.; Murray, C. J.: The adverse effect of iron repletion on the course of certain infections. *Brit. J.IV*(1978), 1113–1115
8. Barry, D. M. J.; Reeve, A. M.: Increased incidence of gram-negative neonatal sepsis with intramuscular iron administration. *Pediatrics* 60(1977), 908
9. Oppenheimer, S. J.: Iron and infection: the clinical evidence. *Acta Paediatr. Scand. Sppl.* 361(1989), 53–62
10. Weinberg, E. D. Iron depletion: a defence against intracellular infection and neoplasia. *Life science* 50(1992), 1289–1297
11. Stevens, R. G.; Yones, D. Y.; Micozzi, M. S.; Taylor, P. R.: Body iron stores and the risk of cancer. *New Engl. J. Med.* 319(1988), 1047–1052
12. Gunshin, H.; Mackenzie, B.; Berger, U. V. et al.: Cloning and characterization of a mammalian proton-coupled metal-ion transporter. *Nature* 388(1997), 482–488
13. Donovan, A.; Brownlie, Y.; Zhou, Y. et al.: Positional cloning of zebrafish ferroportin identifies a conserved vertebrate iron exporter. *Nature* 403(2000), 776–781
14. Kuo, Y.M.; Su, T.; Chen, H. et. al.: Mislocalisation of hephaestin, a multicopper ferroxidase involved in basolateral intestinal iron transport, in the sex linked anaemia mouse. *Gut* 53(2004), 201–206
15. Arosio, P.; Cairo, G.; Levi, S.: The molecular biology of iron-binding proteins. In: De Sousa M.; Brock, J.H. (eds ). *Iron in immunity, cancer and inflammation.* John Wiley & Sons LTD., Chichester, (1989),55–79
16. Harrison, P.M.; Arosio, P.: The ferritins; properties, iron storage function and cellular regulation. *Biochem. Biophys. Acta* 1275(1996), 161–203
17. Hentze, M. W.; Kühn, L.: Molecular control of vertebrate iron metabolism: mRNA-based regulatory circuits operated by iron, nitric oxide, and oxidative stress. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 93(1996), 8175–8182
18. Feder, J. N.; Guirke, A.; Thomas, W. et al.: A novel MHC-class I-like gene is mutated in patients with hereditary haemochromatosis. *Nat. Genet.* 13(1996), 399–408
19. Park, C. H., Valore, E. V.; Waring, A. J.; Ganz, T.: Hepcidin, a urinary antimicrobial peptide synthesized in the liver. *J. Biol. Chem.* 276(2001), 7806–7810
20. Ganz, T.: Hepcidin, a key regulator of iron metabolism and mediator of anemia of inflammation. *Blood* 102(2003), 783–788

21. Bridle K. R.; Frazer, D. M.; Wilkins, S. J. et al.: Hepcidin in HFE-associated hemochromatosis: another piece of the “iron” puzzle. *Gastroenterol.* 126(2004), 615–616
22. Pigeon, C.; Ilyin, G.; Courseland, B. et al.: A new mouse liver-specific gene, encoding a protein homologous to human antimicrobial peptide hepcidin, is overexpressed during iron overload. *J. Biol. Chem.* 276(2001), 7811–7819
23. Mazur, A.; Feillet-Coudray, C.; Romier, B. et al.: Dietary iron regulates hepatic hepcidin 1 and 2 mRNA in mice. *Metabolism* 52(2003), 1229–1231
24. Bridle, K. R.: Disrupted hepcidin regulation in HFE-associated haemochromatosis and the liver as a regulator of body iron. *Lancet* 361(2003), 669–673
25. Frazer, D. M.; Anderson, G. J.: The orchestration of body iron intake: how and where do enterocytes receive their cues. *Blood Cells Mol. Dis.* 30(2003), 288–297
26. Benesch, R.; Benesch, R. E.: The effect of organic phosphates from the human erythrocyte on the allosteric properties of hemoglobin. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 26(1967), 162–167
27. Koury, M. J.; Bondurant, M. C.: Erythropoietin retards DNA breakdown and prevent programmed death in erythroid progenitor cells. *Science* 248(1990), 378–381
28. Alcantara, O.; Obeid, L.; Hannun, Y. et al.: Regulation of protein kinase C (PKC) expression by iron: effects of different iron compounds on PKC-beta and PKC-alpha gene expression and role of the 5'-flanking region of the PKC-beta in the response to ferric transferrin. *Blood* 15(1994), 3510–3517
29. Alcantara, O.; Kalidas, M.; Baltathakis, I.; Boldt, D. H.: Expression of multiple genes regulating cell cycle and apoptosis in differentiating hematopoietic cells is dependent on iron. *Exp. Hematol.* 29(2001), 1060–1069
30. Kuvibidila, S. R.; Poretta, C.; Baliga, B. S.: Iron deficiency alters the progression of mitogen-treated murine splenic lymphocytes through the cell cycle. *J. Nutrition* 131(2001), 2028–2033
31. Perrini, S.; Henriksson, J.; Zierath, J. R.; Widegren, U.: Exercise-induced protein kinase C isoform-specific activation in human skeletal muscle. *Diabetes* 53(2004), 21–24
32. Escanero, J. F.; Villanueva, J.; Herrera, A. et al.: Iron stores in professional athletes throughout the sport season. *Physiol. Behav.* 62(1997), 811–814
33. Malczewska, J.; Raczyński, G.; Stupnicki, R.: Iron status in female endurance athletes and in non-athletes. *Int. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 10(2000), 260–276
34. Nachtigall, D.; Nielsen, P.; Fischer, R. et al.: Iron deficiency in distance runners. A reinvestigation using Fe labelling and non-invasive liver iron quantification. *Int. J. Sports Med.* 17(1996), 473–479
35. Newhouse, I. J.; Clement, D. B.: Iron status in athletes. An uptake. *Sports Med.* 5(1988), 337–352
36. Nielsen, P.; Nachtigall, D.: Iron supplementation in athletes. Current recommendation. *Sport Med.* 26(1998), 207–216

37. Ming, Q. Z.; Sheng, X. D.; Lai, T. P.: Changes of transferrin-free iron uptaken by bone marrow erythroblasts in strenuously exercicited rats. *J. Nutr. Biochem.* 11(2000), 367–377
38. Jenkins, R. R.; Krause, K.; Schofield, L. S.: Influence of exercise on clearance of oxidant stress products and loosely bound iron. *Med. & Sci. in Sports and Exercise* 25(1993)213–217
39. Sheldon, J. H.: Haemochromatosis. Oxford Medical Publications (1935), 164–51
40. Beutler, E.; Hoffbrand, A. V.; Cook J. D.: Iron deficiency and overload. *Hematol* 40(2003), 1–16
41. Merryweather-Clarke, A.; Pouton, J.; Sherman, J. et al.: Global prevalence of putative haemochromatosis mutation. *J. Med. Genet.* 34(1997), 275–280
42. Åsberg, A.; Ilvoo, K.; Thorstonsen, K. et al.: Screening for hemochromatosis: Ihigh prevalence and low morbidity in an unselected population of 65238 persons. *Scand. J. Gastroenterol.* 36(2001); 1108–1115
43. Piperno, A.; Sampietro, M.; Pietrangelo A. et al.: Heterogeneity of hemochromatosis in Italy. *Gastroenterol.* 114(1998), 996–1002
44. Bomford, A.: Genetics of haemochromatosis. *Lancet* 360(2002), 1673–1681
45. Barton, J. C.; Acton, R. T.; Rivers, C. A. et al.: Genotypic and phenotypic heterogeneity of African Americans primary iron overload. *Blood Cells Mol. Dis.* 31(2003), 310–319
46. Njajou, O. T.; Vaessen, N.; Joosse, M. et al.: A mutation in SLC11A3 is associated with autosomal dominant hemochromatosis. *Nat. Genet.* 28(2001), 213–214
47. Pietrangelo, A.; Montosi, G.; Totaro, A. et al.: Hereditary hemochromatosis in adults without pathogenic mutations in the hemochromatosis gene. *The New Engl. Med.* 341(1999), 725–732
48. Papanikolaou, G.; Samuels, M.E.; Ludwig, E. H. et al.: Mutations in HFE2 cause iron overload in chromosome 1q linked juvenile hemochromatosis. *Nat. Genet.* 36(2004), 77–82
49. Roetto, A.; Daraio, F.; Porporato, P. et al.: Screening hepcidin for mutations in juvenile hemochromatosis identification of a new mutation (c70r). *Blood* (2003) in press
50. Camaschella, C.; Roetto, A.; Cali, A. et al.: The gene encoding transferrin receptor 2 is a new type of hemochromatosis mappen to 7q22. *Nat. Genet.* 25(2000), 14–15
51. Pietrangelo, A.: The ferroportin disease. *Blood Cells Mol. Dis.* 32(2004), 131–138
52. Kato, J.; Fujikawa, K.; Kanda, M. et al.: A mutation in the iron response element of H-ferritin mRNA, causing autosomal dominant iron overload. *Am. J. Human. Genet.* 69(2001), 191–217
53. Beaumont, C.; Leneuve, P.; Devaux, I. et al.: Mutation in the iron response element of the L ferritin mRNA in a family with dominant hyperferritinaemia and cataract. *Nat. Genet.* 11(1995), 444–446

54. Nielsen, P.: Gendiagnostische Möglichkeiten der hereditären Hämochromatose: Handbuch der Molekularen Medizin. Monogen bedingte Erbkrankheiten 1. S. 454–475. Hrsg. Ganten, D.; Ruckpaul, K. Springer Verlag 1999
55. Nielsen, P.; Fischer, R.; Engelhardt R. et. al.: Neue Möglichkeiten in der Diagnose der hereditären Hämochromatose. Dtsch. Ärzteblatt 46(1998), C2059–C2065
56. Adams, P. C.; Bradley, C.; Henderson, A. R.: Evaluation of the hepatic iron index as a diagnostic criterion for genetic hemochromatosis. J. Lab. Clin. Med. 130(1997), 509–514
57. Olivieri, N. F.; Brittenham, M.D., Matsui, D. et al.: Iron-chelating therapy with oral deferiprone in patients with thalassemia major. N.E.J.M. 332(1995), 918–922
58. Salonen, J. T.; Nyyssönen, K.; Korpela, H. et al.: High stored iron level are associated with excess of myocardial infarction in eastern Finnish men. Circulation 86(1992), 803–811
59. Klipstein-Grobisch, K.; Grobbee, D. E.; den Breeijen, J. H. et al.: Dietary iron and risk of myocardial infarction in the Rotterdam study. Am. J. Epidemiol. 149(1999), 421–428
60. Sempos, C. T.; Looker, A. C.: Iron status and risk of coronary heart disease. Nutr. Metab. Cardiovasc. Dis. 9(1999), 294–303
61. Sullivan J. L.: Iron and the sex difference in heart disease risk. Lancet 1(1981), 1293–1294

Lothar Kolditz

**Hans-Heinrich Müller unter Mitwirkung von Corné J. Aertssens und Jürgen Wilke: Franz Carl Achard. Verlag Dr. Albert Bartens KG, Berlin 2002, 688 S.**

Über Franz Carl Achard (1753–1821), Pionier der technischen Zuckergewinnung aus Rüben, gibt es zahlreiche Aufsätze, die nur Streiflichter sein können, aber keinen Gesamtblick ermöglichen. Mit diesem Buch wird eine umfassende Biografie vorgelegt, die auf Basis einer gründlichen Recherche den Menschen Achard und seine Zeit in eindrucksvoller Weise darstellt. Dem Leser entwickelt sich das Bild vom Zustand der damaligen Gesellschaft, dem Zusammenleben der Menschen verschiedenen Standes ohne Beschönigung. Die handelnden Charaktere treten mit ihren positiven und negativen Eigenschaften auf. Man wird mitten in diese Zeit versetzt, die Zeit Friedrichs II., gefolgt von Friedrich Wilhelm II., Friedrich Wilhelm III. mit seiner Gemahlin Luise, und es ist auch die Zeit Napoleons.

Der einer vornehmen Hugenottenfamilie entstammende Franz Carl Achard zeigt sich als begeisterter Naturforscher mit zahlreichen, aus heutiger Sicht guten, aber auch weniger guten experimentellen Ansätzen. Es handelte sich damals in der Chemie um den Übergang vom Phlogistonzeitalter zur messenden Chemie des Lavoisier. Achards Lehrer war Marggraf, der den Zuckergehalt der Runkelrübe entdeckte, dessen Gehilfe und schließlich Nachfolger Achard bei der Akademie der Wissenschaften wurde, obwohl Friedrich II., der sich als Präsident der Akademie verstand, zunächst einen Ausländer an die Akademie berufen wollte.

Nach seiner Anstellung an der Akademie musste Achard aber über zwei Jahre warten, bis Friedrich II. ihm ein Gehalt bewilligte. Die Finanzmittel im Staat waren nach dem Siebenjährigen Krieg knapp, die Lage in der Bevölkerung hatte sich durch Teuerung rapide verschlechtert, während sich Berliner Bankiers und Kaufleute hemmungslos bereichern konnten. Achard gehörte nicht dazu, er setzte sein Geld für die Forschung ein, machte das ganze Leben über Schulden im Vertrauen auf Zusagen vom König oder auf Erfolge seiner

Forschung. Er war Wissenschaftler ohne ökonomische Begabung, vertraute auf das Gute im Menschen, verlor anerkennende Worte selbst über böswillige Widersacher wie den Geheimen Obermedizinalrat Hermbstaedt, der von Achard als Akademiemitglied empfohlen wurde, dann aber kaum eine Gelegenheit ausließ, um abfällige Urteile über Achard zu fällen und Verleumdungen in Umlauf zu bringen.

Achards Eifer als Akademiemitglied – dazu vom König 1776, also mit 23 Jahren ernannt – und als Direktor der Physikalischen Klasse der Akademie (Ernennung durch den König 1782) ist durch zahlreiche Berichte, Niederschriften, Veröffentlichungen und Dokumente belegt. Die Gestaltung des wissenschaftlichen Lebens an der Akademie in jener Zeit ergibt sich deutlich daraus.

Die Versuche Achards zur Erforschung von Edelsteinen erstreckten sich über ein Jahrzehnt (1776–1786). Ergebnisse erschienen als Edelsteinbücher in den Abhandlungen der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München, in mehreren Auflagen auch in Berlin und Paris. Ihn interessierten nicht die Kristallformen, sondern die stofflichen Zusammensetzungen. Er wollte auch Edelsteine herstellen, die Versuche waren aber wenig erfolgreich. Zu Schmelzversuchen diente der von ihm erfundene Platintiegel.

Seine Untersuchungen mit Gasen waren Gegenstand von Experimentalvorlesungen in Sitzungen der Akademie, an denen auch der Adel teilnahm. Bei dieser Gelegenheit wurden effektvolle Versuche z. B. mit Phosphor gezeigt, so etwa in Anwesenheit der Prinzessin von Oranien, der Schwester Friedrich Wilhelm II. im Juli 1789.

Bei der Erörterung dieser Versuche fehlt leider die kritische Sicht eines naturwissenschaftlichen Lektors, Beraters oder auch Mitautors, was bei der sonst sehr exakten historischen Arbeit zu bedauern ist. Die Verwandlung phlogistischer in dephlogistische Luft ist die Entfernung von Sauerstoff aus Luft und nicht die Umwandlung von Wasserstoff in Sauerstoff, was er entgegen der Behauptung auf S. 42 unmöglich gezeigt haben kann. Achard hat den Siedeverzug beschrieben und erforscht, nicht die Siedepunktserhöhung. Beide Erscheinungen sind verschiedene Vorgänge. Es ist nicht richtig, dass sich heute für Siedeverzug der Name Siedepunktserhöhung eingebürgert hat (S. 52). Der Beleghinweis zu dieser Aussage auf Brockhaus S. 187 ist ungenau und kann sich wohl keineswegs auf ein heutiges Lexikon beziehen.

Verdienstvoll ist aber, dass die große Vielfalt der Achardschen Untersuchungen beleuchtet wird. Vorwiegend waren diese mit praktischen Absichten verbunden: Baustoffe, Bleiweiß, Metall-Legierungen, färbende Pflanzen,

Verbesserung der Tabakkultur, bodenkundliche Forschungen, Blitzableiter, Elektrizitätsversuche mit medizinischen Aspekten, meteorologische Beobachtungen, optische Telegrafie und Ballonversuche. Eine naturwissenschaftliche Aufarbeitung dieser historischen Fundgrube mit Angaben zur späteren Entwicklung hätte den Wert des Buches sehr gesteigert und Verdienste Achards aus heutiger Sicht noch deutlicher gemacht.

Den Hauptteil des Buches nehmen naturgemäß Achards Verdienste um Rübenanbau und Zuckergewinnung ein. Hier wird äußerst spannend der Kampf Achards um die Entwicklung des technologischen Prozesses der Rübenzuckergewinnung gezeigt und vortrefflich dokumentiert. Man erlebt die Fortschritte, die Rückschläge, lernt die Akteure kennen, erfährt von Neid, Missgunst, Verleumdung, Schlamperei und Bürokratie. Auch in Preußen war nicht alles so, wie es das Klischee von Exaktheit und Pflichterfüllung glauben machen will. Reale Menschen mit Vorzügen und Schwächen offenbaren sich in ihren Handlungen. Parallelen zur Gegenwart drängen sich auf. Es wird deutlich, dass die Prognose über die Entwicklung einer neuen Richtung auch großen Gelehrten misslingen kann. Albrecht Daniel Thaer hätte wohl anders über Achards Bemühungen und über die Zukunft der Rücken Zuckererzeugung geurteilt, wäre er nicht vom Widersacher Achards, dem bereits genannten Hermbstaedt, beeinflusst gewesen (S. 407 usw.). Auch der Begründer der Technologie Johann Beckmann hielt nichts von der Zuckerproduktion aus Rüben (S. 410). Justus von Liebig kannte Achard nicht. Seine Meinung über den Rübenzucker hat er mehrfach geändert, 1828 lobte er die französische Rübenzuckergewinnung, bescheinigte aber in seinen Briefen 1844 der Rübenzuckerproduktion keine Zukunft, um dann 1851 in der vierten Auflage seiner Briefe allerdings „im Aufkommen der Rübenzuckerproduktion in Europa einen wahren Segen für das Menschengeschlecht zu sehen“ (S. 511).

Die vorgelegte Biografie von Franz Carl Achard hat großen Wert in der Interpretation der zahlreichen belegten Recherchen und Dokumente, die auch im Anhang als Berichte, Demonstrationen und Vorlesungen Achards auf den Sitzungen der Akademie der Wissenschaften, als Eingaben und Abhandlungen, als Bibliografie wiedergegeben werden. Viele Anmerkungen zu den einzelnen Seiten vertiefen die historischen Untersuchungen. Abbildungen von Personen, Gebäuden, Dokumenten, Gedenktafeln und gestifteten Medaillen, darunter die Franz-Carl-Achard-Medaille der Akademie der Wissenschaften der DDR (gestiftet 1980) tragen zur Anschaulichkeit des Buches bei. Ohne Zweifel ist Achard der Vater der Rübenzuckerindustrie, was noch deutlicher hätte herausgestellt werden können, wenn auch eine kurze Darstellung

der heutigen Rübenzuckerproduktion gebracht worden wäre. Der Vergleich mit dem Achardschen Vorgehen hätte sich dann sehr leicht im Zusammenhang ergeben. Mit diesen Bemerkungen soll nur auf eine mögliche Verbesserung in einer ergänzten Auflage hingewiesen werden. Franz Carl Achard wurde mit diesem Buch ein würdiges und verdientes Denkmal gesetzt.

Gert Blumenthal

**Colin J. Campbell, Frauke Liesenborghs, Jörg Schindler und Werner Zittel: Ölwechsel! Das Ende des Erdölzeitalters und die Weichenstellung für die Zukunft. Hrg.: Global Challenges Network. Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, München, 2. Auflage, Mai 2003. 260 S.**

Wieder einmal wird das „Ende des Erdölzeitalters“ heraufbeschworen – wie oft noch, möchte man fragen. Ein weiteres Katastrophen-Szenario? Nicht genug damit, wird sogar „die Weichenstellung für die Zukunft“ in Aussicht gestellt.

Doch ein Blick auf den Herausgeber „Global Challenges Network“ (GCN) mit seinem Präsidenten Hans-Peter Dürr hält davon ab, das Buch gleich aus der Hand zu legen. Und zusätzlich neugierig machen die Autoren: Colin J. Campbell, Geologe, kennt das „Ölgeschäft“ aus jahrzehntelanger Erfahrung, Frauke Liesenborghs ist Geschäftsführerin von GCN, und die Herren Schindler und Zittel gehören der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik an – ein kompetentes, unabhängiges Team, dem man sich auf einem derart komplizierten und kontrovers diskutierten Feld anvertrauen kann.

Die Ausgangsthese des Buches „Wir sind – und zwar schon längst – in einem gesellschaftlichen Strukturbruch. Da Energie der Motor alles Lebendigen war, ist und sein wird, bleibt die Frage nach den Ressourcen die wichtigste“ geht klar gegen die einlullenden, beruhigenden Verlautbarungen mancher „Energie-Experten“ und der großen Erdöl-Produzenten und provoziert die Frage „Was für ein Strukturbruch?“ Und diese These rüttelt an der besinnungsarmen Gelassenheit des „business as usual“: Vorgelegt wird hier nicht ein Text über *irgendeinen* technischen Zusammenhang, in dieser oder jener Form schon hundertfach abgehandelt, nein, die Autoren insistieren, es sei „die Frage nach den Ressourcen die wichtigste“! Mit einer gewissen Hartnäckigkeit geht es weiter: „Es geht bei den Ausführungen wohlgermerkt nicht um eine Hinführung zu „glauben“ oder „nicht glauben“. Dargestellt werden zukünftige, realistische Perspektiven. Die Grundaussage lautet: Es ist mögl-

ich, Energieversorgungen zu schaffen, die für alle schadensfrei und (zukünftig) unendlich zur Verfügung stehen. Das ist das Prinzip der Nachhaltigkeit.“

Damit versprechen die Autoren einen weiten Bogenschlag von der geologischen Entstehung der heute wichtigsten Ressourcen Erdöl und Erdgas bis hin zur Vision des „Solarzeitalters“ – dieses ohne jede fossile und nukleare Energie. Das Versprechen wird im Wesentlichen gehalten, wenn auch die alternativen Energien unverdient kurz abgehandelt werden.

Der Stil ist durchgehend nüchtern und klar, an einigen Stellen zupackend, was der existenziellen Bedeutung der Thematik gut tut. Die komplexen Zusammenhänge, vertieft und quantifiziert durch lehrreiche Graphiken, sind überwiegend verständlich dargestellt, erfordern jedoch einen mitdenkenden Leser. Der von Technokraten häufig hochgehaltene präventive Skeptizismus fehlt, stattdessen spürt man den reflektierten, praktischen Humanismus der Verfasser.

Der Text ist in vier Abschnitte gegliedert: „GEOLOGIE“ (104 Seiten), „POLITIK“ (49 S.), „DIE AKTUELLE DEBATTE“ (19 S.) und „STRUKTURBRUCH“ (62 S.).

Der Titel „GEOLOGIE“ ist etwas ungenau geraten, denn der Text dieses Abschnitts geht über geologische Zusammenhänge der Entstehung von Öl und Gas weit hinaus.

Analysiert wird die historische Statistik und daraus geschlossen: „Aus der historischen Entwicklung der Funde kann man durch Analyse und Extrapolation mit einiger Verlässlichkeit sagen, wieviel Öl man noch finden wird.“ Angesichts der Feststellung, daß in den 60er Jahren durchschnittlich 40 Gb/a (Giga-Barrel pro Jahr) gefunden wurden, und seitdem die jährlichen Ölfunde zurückgehen, ist man fassungslos darüber, was der Öffentlichkeit seitens mancher großer Ölfirmen und Medien seit Jahrzehnten weisgemacht wird. Dabei ist der Trend der letzten Jahre überdeutlich: „Seit etwa 20 Jahren übersteigt die jährliche Produktion die Neufunde.“

Die Autoren polemisieren gegen die Überbewertung des Terminus „Reichweite“, der zu falschen Aussagen führe oder sogar bewußt mißbraucht werde: Die „Reichweite“, die berechnete Zeit, zu der der letzte Tropfen gefördert wird, sei irreführend, denn maßgebend sei vielmehr der Verlauf der Förderraten. Diese beschrieben annähernd eine Glockenkurve (idealisiert), und wirtschaftliche wie politische Auswirkungen machten sich schon bemerkbar, wenn das Maximum überschritten sei. Nicht der Zeitpunkt der absoluten Erschöpfung einer Ressource sei besonders wichtig, sondern der Zeitraum der maximalen Verfügbarkeit (z.B. das Jahr der maximalen Jahres-

förderung). John Brown, Vorsitzender von BP, schätzt die maximale Förderrate der Welt auf 90 Mb/d, die Autoren vorliegenden Buches eher auf 80 Mb/d. Etwa 90 % des förderbaren Öls seien bereits gefunden, und wahrscheinlich werde das weltweite Fördermaximum schon 2005–2010 erreicht.

Die bestimmenden Größen der Ressourcenwirtschaft werden erläutert und in Beziehung zueinander gesetzt: kumulierte Funde, bereits geförderte Menge, Reserven, insgesamt förderbare Menge, noch zu findende Menge und noch zu fördernde Menge.

Im größten Teil des ersten Abschnitts werden alle wichtigen erdöhlhörigen Provinzen des Erdballs untersucht. Kurze, instruktive geschichtliche Darlegungen verdeutlichen, welche wirtschaftlichen und politischen Triebkräfte Erdöl-Exploration und -Förderung in immer neue Territorien lenkten. Das Kapitel „Der Mittlere Osten“ ist hochaktuell und läßt die politischen und militärischen Bewegungen der globalen Supermacht und ihrer willigen Helfer viel tiefer verstehen als es verlogene Auslassungen über den Kampf für die Menschenrechte und gegen den Terrorismus vermögen.

Lehrreich, auch für nicht im Ölsektor tätige Wissenschaftler und Techniker, sind die Ausführungen über „nichtkonventionelles Erdöl“, d.h. Ölschiefer, Teersande und Schweröle – eine Kohlenwasserstoff-Ressource, rechnerisch viel größer als das gesamte abbaubare konventionelle Öl. Die Autoren erläutern die komplizierten technologischen Aufbereitungs- und Gewinnungsverfahren für diese in meist entlegenen Territorien befindlichen Vorkommen, die bei Produktionsausweitungen kaum mehr beherrschbaren Umweltzerstörungen (Abraummassen!) und die in vielen Fällen zu erwartenden Preissteigerungen – Zusammenhänge, die ausgesprochen euphorie-dämpfend wirken. Z.B. wird bei Teersanden mit einem Energieerntefaktor<sup>1</sup> von eins gerechnet!

Für Erdgas werde das Weltfördermaximum schon für 2020 oder früher erwartet, und die Hoffnung auf Gas als den mittelfristigen Nachfolger des Erdöls könne sich als trügerisch erweisen. Dann wird das „nichtkonventionelle Gas“ untersucht: Grubengas, Gasschiefer, Tiefseegas, Polargas – summarisch ebenfalls riesige Vorkommen, aber meist lokal konzentriert, schwer zugänglich und mit hohen Anforderungen an z.T. neue, energieintensive Technologien – Bedingungen, die die Preise für ein derartiges Gas hochtreiben würden.

---

1 Energieerntefaktor = aus dem Brennstoff gewinnbare Energie / für die Produktion des Brennstoffs aufgewendete Energie

Auch die Gashydrate der Tiefseeböden werden „entzaubert“: Nirgends seien bislang Felder genügender Flächenausdehnung und Mächtigkeit gefunden worden (obwohl das Gesamtvolumen von Methan in Tiefsee-Gashydraten auf  $10^9$  km<sup>3</sup> geschätzt wurde<sup>2</sup>, G.B.), zumal auch hierbei ein Teil der gewonnenen Energie wieder aufzuwenden sei, um durch Zersetzung des festen Gashydrats das Zielprodukt Methan auszutreiben.

Auch der Abschnitt „POLITIK“ läßt tiefer blicken, als der Titel erahnen läßt. Die Aussage „Trotz aller ‚Zufälligkeit‘ ist durch die Politik der Westmächte im letzten Jahrhundert ein Muster angelegt worden, das in der jüngeren Vergangenheit und Gegenwart weiterhin dramatisch Geschichte schreibt“ belegen die Autoren durch eine Vielzahl historischer Ereignisse, die der ältere Zeitgenosse zwar noch im Gedächtnis haben mag, die er aber meist nicht in den hier beschriebenen Kontext einordnen konnte. Hierzu müssen einige Stichpunkte aus der Geschichte nach 1945 genügen: Das Iran-Öl und Mossadegh – der Krieg Irak / Iran (1. Golfkrieg) und der diesbezügliche, höchste innere Beteiligung bezeugende Ausspruch Henry Kissingers „Ich hoffe, sie bringen sich gegenseitig um“ – die Taliban als der USA-Stoßtrupp gegen die UdSSR. Die aktuelle Politik im Nahen Osten wird nüchtern gesehen: „Die Jagd auf Terroristen bringt auf jeden Fall eine Beute: Die ‚begründete‘ Präsenz in dieser Region, die etwas hat, was die USA dringend brauchen – Erdöl und Erdgas.“

Sucht man nach nicht so offensichtlichen Wendepunkten der Geschichte, hier ist ein solcher: Die OPEC-Staaten, noch heute im allgemeinen Verständnis die Krösusse der Welt – diese Staaten seien heute stark verschuldet und empfindlich abhängig von den Öl-Einnahmen!

Die zunehmende Abhängigkeit der Industriestaaten vom Öl wird besonders augenfällig im Transportwesen: Mehr als 60 % der Ölförderung gingen in den Verkehrssektor (hauptsächlich in den Straßen- und Flugverkehr), und dieser werde zu >90 % vom Erdöl gespeist. Die Folgen dieser Abhängigkeit wird der zivile Bereich als erster verspüren, denn die modernen, hochmobilen Armeen wären ohne kontinuierliche Versorgung mit riesigen Mengen Treibstoffen nicht mehr als unbewegliche Angriffsziele.

Der Abschnitt DIE AKTUELLE DEBATTE wird eingeleitet mit einer Analyse der heute für Ressourcenschätzungen meistverwendeten Datenquellen, der Techniken und Tricks derartiger Schätzungen sowie der Motive für die nach wie vor optimistischen Prognosen.

2 Thomas Gold, „Das Jahrtausend des Methans“, ECON Verlag Düsseldorf 1988, S. 209.

Der Leser erhält Einblicke in das Ursachengeflecht, aus dem heraus in den Medien, z.T. aber auch in Fachjournalen, widersprüchliche und zuweilen verwirrende Einschätzungen über die Ressourcenlage gedeihen. Ökonomen, Ökologen und Geologen kämen aus verschiedenen Gründen zu konträren Aussagen.

Der Ökonom sei immer optimistisch, überzeugt von der Allmacht der Marktmechanismen und kennt keine Ressourcenproblematik.

„Demgegenüber argumentieren Experten mit geologischem Hintergrund, dass dem historischen Maximum der Ölfunde notwendigerweise auch bald ein Maximum der Produktion folgen müsse. Diese Autoren, die selbst lange Jahre in der Exploration tätig waren, beziehen ihre Informationen aus eigenen Erfahrungen, aus dem Austausch mit Kollegen sowie der Analyse von Statistiken aus der Explorationsszene.“

Ökologen hingegen seien zuweilen derart auf die Treibhausgas-Problematik fixiert, daß sie die Ressourcenproblematik als ein Ärgernis vernehmen, das nur von dem Treibhauseffekt ablenkt! „Doch Klimapolitik und Vorsorge auf der Ressourcenseite sind keine Gegensätze, sondern erfordern Maßnahmen genau in derselben Richtung. Diese verstärken den gemeinsamen Handlungsdruck, aber auch die Bereitschaft zum Überdenken der Energiepolitik“, - eine Formulierung, die korrekterweise die Ganzheit der gegenwärtigen gesellschaftlichen Auseinandersetzung hervorhebt.

Der letzte Abschnitts-Titel STRUKTURBRUCH läßt eine gewisse Geistesverwandtschaft mit dem „Club-of-Rome“-Bericht „Die globale Revolution“<sup>3</sup> erkennen, der seinerzeit so manchen bürgerlichen Zeitgenossen aufgeschreckt hatte. Beide Werke lassen die gesellschaftlichen Träger dieses Umbruchs zwar unbenannt – was angesichts des Fehlens einer aktuellen Revolutionstheorie den Autoren nicht anzulasten ist – lassen aber keinen Zweifel daran, daß der politische Handlungsdruck infolge Bündelung der sich verschärfenden globalen Widersprüche wächst.

Der Rezensent begrüßt, daß den Grundaussagen des 1. Berichts des Club of Rome (1972) durch die vorliegende Arbeit Gerechtigkeit widerfährt. Viele Aspekte der Prognosen dieses Berichts seien in den vergangenen dreißig Jahren schärfer konturiert worden, und heute werde deutlich, daß der schon damals vorausgesagte Strukturbruch unvermeidlich sei, aber nun auf höherem

---

3 Alexander King, Bertrand Schneider, „Die globale Revolution“, Club of Rome – Bericht 1991, Spiegel Spezial Nr. 2 / 1991, 130 S.

Abhängigkeitsniveau eintreten werde, als es in den siebziger Jahren existiert hat.

Strukturbrüche kündigten sich heute auf verschiedenen Feldern fast gleichzeitig an, wie man sehen könne an den jährlichen Zuwachsraten der Bevölkerung, der Getreideproduktion, des Primärenergieverbrauchs, des Erdölverbrauchs und der anthropogenen Kohlendioxid-Emission.

Eine schwerwiegende Feststellung: Das Maximum der Erdölförderungsrate markiert den Anfang vom Ende der wachstumsdominierten Ära! „Diesen Übergang von zunehmendem zu abnehmendem Verbrauch mit all seinen Nebenwirkungen und Verflechtungen zu meistern, kann man als die Lebensaufgabe der heute lebenden Generation ansehen... Ein solcher Wechsel ist tief greifend, und seine Auswirkungen betreffen wohl alle Lebensbereiche. Viele der zahlreichen und komplexer werdenden Probleme der vergangenen Jahre sind auf diese Neujustierung des Kompasses zurückzuführen – sie lassen sich als Vorboten eines beginnenden Umbruchs deuten.“

Wo werden die Auswege gesehen? Allgemein in den aus dem Grundsatz der Nachhaltigkeit (Gro H. Brundtland 1992) folgenden Leitlinien, konkreter in der Realisierung der Triade von Suffizienz, Effizienz<sup>4</sup> und Erneuerbaren Energien – in unauf löslicher Wechselwirkung miteinander.

Die Erneuerbaren Energien werden ihrer gesellschaftlichen und technikgeschichtlichen Bedeutung gemäß richtig charakterisiert, nicht als ephemere Nischenprodukte begrenzter Leistungsfähigkeit (als die sie von Skeptikern, von Interessenvertretern großer Energie-Versorgungsunternehmen und zuweilen selbst von altherwürdigen Wissenschaftsakademien diskreditiert werden<sup>5</sup>), sondern durch den Satz: „Tatsächlich wurde im vergangenen Jahrzehnt der Grundstein für eine sich neu bildende Industrie gelegt, wovon die Windenergie als erste bereits industrielle Größenordnung erlangt hat.“

Bei aller Wertschätzung des Gesamtwerks hält der Rezensent aber gerade die Ausführungen über die Erneuerbaren Energien für kritikbedürftig.

So wird unter „Solarthermie“ zwar die sehr wichtige Warmwasserbereitung besprochen, die für die Elektroenergie-Erzeugung (z.B. in Marokko, auch für Europa!) und die Solarchemie so aussichtsreiche Hoch- und Mitteltemperatur-Solarthermie (Rinnen- und Turmkraftwerke, Dish/Stirling-Systeme) aber nicht einmal genannt.

---

4 E.U. v. Weizsäcker, A.B. Lovins, L.H. Lovins, „Faktor vier“, Der neue Bericht an den Club of Rome, Droemersch Verlagsgesellschaft Th. Knaur Nachf., München 1995, 352 S.

5 „Deutsche Energieforschung und Energiepolitik auf dem Prüfstand“, Leopoldina Nachrichten Nr. 10, Beilage der Naturwissenschaftlichen Rundschau 57 (3) 2004, 1–3.

17 GW Windanlagen-Leistung kann mehr als nur 4 Kernkraftwerke ersetzen: Das leistungsstärkste deutsche Kernkraftwerk KKI II Isar bringt 1475 MW ans Netz.

Meeresenergie-Wandler werden nicht erwähnt, obwohl gerade sie sich zunehmend als vielversprechend erweisen und außerdem Wellenenergie eine etwa einhundertmal größere Leistungs-Flächendichte aufweist als jede andere der Erneuerbaren Energiequellen.

Überwiegend wird in der Ressourcen-Literatur eine Tatsache konsequent ausgeblendet: Nach Erschöpfung der fossilen Kohlenstoff-Ressourcen ist die Versorgung der Gesellschaft mit kohlenstoffhaltigen *Stoffen* (Kunststoffen, Textilien, Chemikalien) noch wesentlich prekärer als die Versorgung mit *Energie*! Kann Biomasse allein dem gleichzeitigen Verwertungsdruck zu Energie und Stoff standhalten? Leider bietet auch das vorliegende Werk keinen Hinweis auf diese Problematik.

Schließlich noch eine Frage an die Autoren: Läge es nicht im Interesse einer umfassenden Beurteilung des Komplexes „Fossil-Ressourcen“, auch Thomas Gold (Fußnote 2) zu berücksichtigen, der eine neue Theorie der abiogenen Erdölentstehung vertritt und auch bestechende Argumente dafür vorgelegt hat?

Gerhard Öhlmann

## **Günther Rienäcker**

### **Laudatio zu seinem 100.Geburtstag**

Vorgetragen in der Sitzung der Klasse Naturwissenschaften am 13.05.2004.

Heute, am 13. Mai 2004, auf den Tag genau, jährt sich zum hundertsten Male der Geburtstag unseres langjährigen Mitglieds Günther Rienäcker.

Viele von uns werden sich seiner erinnern, sei es als leidenschaftlicher Forscher und Hochschullehrer von internationalem Rang, sei es als Generalsekretär der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, stets aber als eines allseitig gebildeten, vielseitig begabten, die Musik wie seine Wissenschaft, die Chemie, liebenden Menschen, als eines zuverlässigen Kollegen und für manche auch als eines guten, väterlichen Freundes.

Günther Rienäcker wurde in Bremen im Hause des Lehrers Franz Rienäcker geboren. In seiner Heimatstadt besuchte er das Realgymnasium und beendete dieses zu Ostern 1922 mit der Reifeprüfung.

Trotz seiner Liebe und Begabung zur Musik entschied er sich für ein Studium der Naturwissenschaften, und so bezog er im Sommersemester des gleichen Jahres als Student der Chemie die Universität München.

Schon während seiner Studienzeit konnte er die ersten Unterrichtserfahrungen sammeln, denn sein Lehrer, Prof. Hönigschmid, hatte ihm eine Aufgabe als Hilfsassistent im analytischen Saal übertragen, wo er im qualitativen und quantitativen analytischen Praktikum mitzuwirken hatte.

Das Studium beendete er erfolgreich mit der letzten der beiden Verbandsprüfungen im Jahre 1925 und begann dann im Privatlabor von Hönigschmid, auf Anregung von Dr. Zintl, damals noch Dozent, eine experimentelle analytische Arbeit über „Neue potentiometrische Titrationsmethoden zur Bestimmung von Schwermetallen“, mit deren Ergebnissen er im Oktober 1926 an der Universität München bei Hönigschmid und Wieland promovierte.

Zur Vervollkommnung seiner Ausbildung übernahm er noch im gleichen Jahr für vier Semester eine Assistentenstelle im Institut für physikalische Chemie der Universität Freiburg als Privat- und Vorlesungsassistent von Prof.

von Hevesy und ging dann als Unterrichtsassistent 1928 zurück zu seinem Lehrer Zintl, der inzwischen Professor und Leiter der anorganischen Abteilung des Chemischen Laboratoriums der Universität geworden war.

Nach Abschluss einer Arbeit auf anorganisch-präparativem Gebiet gemeinsam mit Zintl begann etwa ab 1929 die selbständige Schaffensperiode Rienäckers als Forscher auf dem Gebiet der damals noch jungen Mischkatalyse, zunächst noch parallel zu dem Gebiet der Mineralanalyse, später dann ausschließlich.

Der Begriff Mischkatalyse (Mehrstoffkatalyse) war von dem Ostwald-Schüler, Alwin Mittasch, geprägt worden, der unter „Mischkatalysatoren ein aus zwei oder mehreren Bestandteilen derart zusammengesetzten Körper verstand, dass das während der Katalyse bestehende Mengenverhältnis dieser Bestandteile von vorn herein bei der Herstellung des Katalysators innerhalb gewisser Grenzen willkürlich bestimmbar ist“.

Im angestrebten günstigsten Fall wird dabei die Wahl der Komponenten so getroffen, dass ihre Kombination zu einer signifikanten Verstärkung der katalytischen Wirkung führt, die deutlich über der bloßen Addition der Wirkung beider Komponenten liegt. Die Komponente, die diesen Effekt erzeugt und die gewöhnlich in geringerem Prozentsatz vorhanden ist, nannte Mittasch in den BASF-Patenten Aktivatoren. Eingebürgert hat sich dafür aber der aus dem Englischen stammende Begriff Promotor.

Mittasch, ab 1904 Mitarbeiter der BASF, war an der Entwicklung des Katalysators der Ammoniaksynthese durch Haber und Bosch beteiligt, wobei er gemeinsam mit seinen Mitarbeitern die Mehrstoffkatalysatoren entdeckte. Die bis dahin in der chemischen Industrie angewandten, wenigen heterogenen Katalysatoren waren Einstoffkatalysatoren.

Erst mit der großtechnischen Ammoniaksynthese, deren Entwicklung einen Meilenstein in der Geschichte der noch jungen heterogenen Katalyse markierte, nicht nur wegen der wirtschaftlichen Bedeutung der Stickstofffixierung aus der Luft, oder weil hier erstmalig die physikalische Chemie in der Kombination von Thermodynamik, Reaktionskinetik und heterogener Katalyse voll industriewirksam wurde, sondern auch, weil hier neue Wege für die Auswahl von Stoffsystemen als Katalysatoren gewiesen wurden, die prinzipiell bis heute gelten. Mittasch und seine Mitarbeiter hatten mehr als 3000 systematisch variierte Stoffkombinationen in nahezu 20 Tausend Prüfversuchen untersucht, bis sie den promotierten Eisenkontakt entwickelt hatten, der dann 1910 von ihnen patentiert und großtechnisch eingesetzt wurde.

Als Rienäcker sich nun 20 Jahre später aus eigenem Antrieb daran machte, das Gebiet der Mischkatalysatoren wissenschaftlich zu bearbeiten, war er sich darüber im Klaren, dass eine Chance, neue Erkenntnisse über die Wirkungsweise solcher Katalysatoren zu gewinnen nur bestand, wenn er Stoffsysteme und Reaktion extrem vereinfachte und ein von den konkreten Reaktionsbedingungen wenig abhängiges Maß für die katalytische Aktivität verwendete.

So wählte er in seiner Habilitationsarbeit als Reaktion den Zerfall der Ameisensäure, der katalytisch sowohl als Dehydrierung zu  $\text{CO}_2$  und Wasserstoff, als auch als Dehydratation zu  $\text{CO}$  und Wasser verläuft.

Als Katalysatoren dienten ihm Mischkristallreihen aus Kupfer mit Silber und Kupfer mit Gold. Wegen der hohen Sauerstoffbeständigkeit dieser Metallkombinationen war die Wahrscheinlichkeit der Bildung unerwünschter Oxidphasen gering. Als Maß der Aktivität bestimmte er die Aktivierungsenergie der Reaktion.

Da alle bis dahin untersuchten Mischkontakte mehrphasige also heterogene Gebilde waren, setzten die Versuche zur Erklärung der Wirksamkeit dieser Feststoffe gewöhnlich auch bei ihrer Zwei- oder Mehrphasigkeit an. Im System Kupfer-Gold gab es aber in der Mischkristallreihe mit ungeordneter Atomverteilung bei zwei Zusammensetzungen homogene einphasige Mischkristalle, deren katalytische Eigenschaften Rienäcker natürlich besonders interessierten. Er wies nach, dass die Anwesenheit eines gegenseitigen Verstärkungseffektes beider Komponenten *nicht* an die Existenz von Phasengrenzen zwischen ihnen gebunden ist. Diese Erkenntnis gehört zu den wichtigen Ergebnissen seiner Habilitationsschrift.

Ohne, dass es möglich wäre, dies im Rahmen dieser Würdigung im einzelnen zu belegen, sind die Schlussfolgerungen die Rienäcker am Ende seiner Schrift formuliert, für ihn als programmatisch anzusehen. Sie ziehen sich wie ein roter Faden durch sein gesamtes weiteres Lebenswerk als Forscher. Er schreibt:

„Das Ziel der gesamten Katalyseforschung ist letzten Endes die Erkenntnis des Wesens der (dieser) Wechselwirkung zwischen Katalysator und Substrat. Die Zurückführung jeder katalytischen Wirkung allein auf rein struktureometrische Zusammenhänge wird nicht zum Ziele führen, den Einflüssen chemischer Natur muss größte Wichtigkeit eingeräumt werden. Es ist die Aufgabe der Zukunft, gerade für die Kräfte chemischer Art, die zwischen Katalysator und Substrat wirksam sind, Maß und Anschauung zu gewinnen.“

Das wurde 1933 geschrieben, als solche Gedanken keineswegs Allgemeingut unter den Katalyseforschern waren. Auch in späteren Jahrzehnten hat es immer mal wieder Auffassungen und Hypothesen gegeben, in denen die Bedeutung kollektiver physikalischer Festkörpereigenschaften für die katalytische Wirkung überbetont wurde, die jedoch für den Erkenntnisfortschritt keineswegs unproduktiv waren, sich letztlich aber als allgemeingültige Theorien nicht durchsetzen konnten, da sie jeweils nur einzelne Facetten der komplexen Erscheinung Katalyse widerspiegeln.

Ein wenig später soll noch beispielhaft an einigen Arbeiten Rienäckers mit seinen Schülern gezeigt werden, wie er seine Auffassung von der chemischen Natur der heterogenen Katalyse weiter verfolgte.

Kehren wir aber zunächst zurück zu seinen weiteren Lebensdaten.

Seine Habilitationsschrift lag in dem Jahr vor, als in Deutschland Hitler an die Macht kam. Wegen der Ablösung der Habilitationsordnung durch eine „Reichshabilitationsordnung“, konnte sich Rienäcker erst 1935 in Freiburg habilitieren. Seit 1934 hielt er in Freiburg aber schon Vorlesungen in analytischer und anorganischer Chemie, obwohl er erst 1936 zum Dozenten ernannt wurde.

Am Ende des gleichen Jahres erhielt er auf Empfehlung von Adolf Windaus, einem erklärten Gegner des Faschismus, den Auftrag der Vertretung der Professur für anorganische, analytische und technologische Chemie an der Universität Göttingen. Nicht unwesentlich hatte zu dieser Empfehlung die Tatsache beigetragen, dass Rienäcker unter seinen Freunden und guten Bekannten ob seiner ablehnenden Haltung gegenüber den Nazis bekannt war.

Noch im selben Jahr folgte seine Ernennung zum beamteten außerordentlichen Professor und Abteilungsvorsteher der anorganischen Abteilung am Allgemeinen Chemischen Laboratorium der Universität. Gleichzeitig wurde er Vorstand des dem Laboratorium angegliederten Technologisch-chemischen Instituts. Zu den bisherigen Vorlesungen in anorganischer und analytischer Chemie kamen nun auch noch die Vorlesungen über anorganische Experimentalchemie und anorganische Technologie hinzu.

Aber die damit verbundenen Belastungen bedrückten ihn nicht, denn er war mit Leib und Seele Lehrer und er hat später oft von seinen ehemaligen Studenten dankbar erfahren dürfen, wie sehr sie seine Vorlesungen geschätzt haben.

Auch in seinem privaten Leben hatte sich in diesen Jahren einiges verändert. Seit 1932 war er verheiratet. Seine Frau Lotte war ihm treuer Begleiter und steter Ratgeber in allen Lebenssituationen bis zu seinem Tode. 1936 und 1939 wurden seine beiden Söhne Jürgen und Gerd geboren, die später eben-

falls eine erfolgreiche wissenschaftliche Laufbahn einschlugen, der Älteste in der Physik, der Jüngere in den Musikwissenschaften. Die Neigungen des Vaters zur Musik und zu den Naturwissenschaften haben sich in ihnen gewissermaßen getrennt vererbt. Das Glück der Geburt einer Tochter erlebte er mehr als ein Jahrzehnt später im Jahre 1951. Auf seine Tochter Anne, heute Fachärztin für innere Medizin, blickte er stets mit besonderem Wohlgefallen.

Nachdem seit Kriegsbeginn praktisch alle Mitarbeiter einberufen worden waren, hatte Rienäcker in seiner Lehrtätigkeit immer stärkere Belastungen auf sich zu nehmen.

Auch an ihm ging der Einberufungsbefehl zunächst nicht vorbei, aber da man selbst während des Krieges auch noch Chemiker brauchte und diese auszubilden waren, wurde er schon nach kurzer Zeit zurückgestellt.

Der Krieg hemmte die Forschungsarbeit und führte zu einer enormen Inanspruchnahme der wenigen noch tätigen Hochschullehrer in der Lehre. Dennoch setzte er seine Forschungsarbeiten auch in dieser Zeit auf dem Gebiet der Mischkatalyse und auf analytischem und präparativ anorganischem Gebiet fort.

Im Herbst 1942 wurde Rienäcker als ordentlicher Professor und Direktor des Chemischen Instituts an die Universität Rostock berufen. Wiederum wirkte sich seine antifaschistische Haltung darauf positiv aus, denn sein alter Studienfreund, der Rostocker Organiker Prof. Maurer, der Rienäckers Standpunkt kannte, war froh, dass Rienäckers Vorgänger, ein bekennender Nazi, weggegangen war, und setzte seine Berufung durch.

Angesichts der wiederholten Beschädigungen des Rostocker Instituts durch den Bombenkrieg war eine normale Lehr- und Forschungstätigkeit in den letzten Kriegsjahren sehr erschwert, denn oft mussten erst die Trümmer wieder beseitigt werden, bevor die Arbeit weiter gehen konnte. Nach Beendigung des Krieges wurde Rostock jedoch zu der Stadt, in der für ihn ein neuer, entscheidender Lebensabschnitt begann.

Seine humanistische Grundüberzeugung gepaart mit den bitteren Erfahrungen im faschistischen Deutschland waren der Ausgangspunkt seines Engagements für ein antifaschistisches, demokratisches und sozial gerechtes Deutschland. Schon damals war er zu der Erkenntnis gelangt, dass dieses auch an eine neue Wirtschaftsordnung geknüpft sein musste. In einem Artikel „Die naturwissenschaftliche Forschung und die Wirtschaft“ schrieb er in den fünfziger Jahren:

„Die neue Wirtschaft wird nicht mehr von dem alleinigen Gedanken beherrscht sein, unbedingt Profite zu erbringen (was nichts mit der Frage zu tun

hat, dass selbstverständlich die Wirtschaft im Ganzen rentabel zu sein hat), sondern sie hat dem Ziel zu dienen, den Wohlstand der Gesamtheit und nicht nur den Wohlstand einzelner zu heben.“

Folgerichtig übernahm Rienäcker 1945 als Aktivist der ersten Stunde das Amt des Dekans der philosophischen Fakultät der Universität Rostock und wurde im Januar 1946 ihr erster Rektor, ein Amt, das er bis zum März 1948 ausübte. Auch danach blieb er bis 1949 Prorektor der Universität, deren Ehrensensator er bis heute ist.

Neben seiner gewählten Mitgliedschaft in verschiedenen parlamentarischen Organen auf Landesebene (1950 Landtag von Mecklenburg) bis hin zur Provisorischen Volkskammer (bis 1950) folgte er seiner musischen Neigung und engagierte sich über viele Jahre in verschiedenen ehrenamtlichen Funktionen des Kulturbundes der DDR und als Vorsitzender der Gewerkschaft Wissenschaft und in dieser Eigenschaft auch in der „Weltföderation der Wissenschaftler“.

Bereits 1946 hatte er die Herausgeberschaft der „Zeitschrift für anorganische Chemie“ übernommen, eine Aufgabe, die ihm sehr ans Herz wuchs und die er nach seiner Pensionierung gern als sein „Altenteil“ bezeichnete.

Auch sein Konzept eines Instituts für Katalyseforschung, gemeinsam mit Langenbeck als Vertreter der Organischen Katalyse erarbeitet, konnte 1951 in Rostock Wirklichkeit werden.

Der anorganische Teil dieses Instituts wurde nach seiner Berufung zum Professor für anorganische Chemie an die Humboldt-Universität Berlin im Jahre 1954 als selbständiges Institut für anorganische Katalyseforschung der DAW in dem neu errichteten Institutsbau in Berlin Adlershof eingerichtet. Viele seiner Rostocker Mitarbeiter folgten damals ihrem Lehrer nach Berlin. Mit der Bildung der Zentralinstitute wurde das Institut als selbständiger Bereich in das Zentralinstitut für physikalische Chemie eingegliedert. Bis zu seiner Emeritierung im Jahre 1969 blieb Rienäcker der Direktor dieser Einrichtung.

In dieser Zeit der Existenz des Instituts in Rostock und in Berlin entstanden wesentliche Arbeiten über Misch- und Trägerkatalysatoren.

Kehren wir deshalb an dieser Stelle noch einmal kurz zu seiner Forschung zurück.

In Untersuchungen mit seinen Schülern (H. Bremer, S. Unger) über die katalytische Wirksamkeit von Kupfer- und Silberpulvern in Abhängigkeit von der Vorerhitzungstemperatur zeigte sich, dass die spezifische Aktivität, d. h. die auf die Fläche bezogene Aktivität der Katalysatoren beim Sintern nicht

abnahm, wie man es nach der Taylorschen Vorstellung von Aktivzentren als ungeordnete Bezirke, gittermäßig nicht streng geordnete Atome oder Atomgruppen und andere gestörte Zustände der Oberfläche erwarten sollte, sondern im Gegenteil sogar etwas größer wurde. Gerade die gut ausgebildeten Kristallflächen des metallischen Katalysators mussten also für die katalytische Aktivität verantwortlich sein.

Der hieraus entwickelte Gedanke, dass die Aktivität für die verschiedenen Kristallflächen unterschiedlich sein könnte, wurde tatsächlich in Arbeiten mit seinen Schülern (J. Völter, M. Schön, I. Krüger) an Einkristallen unter Hochvakuumbedingungen bestätigt.

Diese Erkenntnis war ein wichtiger Beitrag zur Überwindung der Auffassungen, wonach die Katalyse in erster Linie durch defekte Kristallstrukturen verursacht wird, und trug dazu bei, die Aufmerksamkeit der Forschung wieder stärker auf die chemische Natur der Katalyse zu lenken.

Schließlich hat Rienäcker sich in dieser Zeit auch verstärkt oxidischen Misch-Katalysatoren zugewandt. Es war damals schon versucht worden, die Aktivität individueller Oxide in katalytischen Oxydationsprozessen wie der Oxydation von Kohlenmonoxid mit der Reduzierbarkeit der Oxide bzw. mit ihrer Sauerstofftension zu korrelieren.

Aus der Reihe von Arbeiten Rienäckers zu den Mischoxyden seien hier die Untersuchungen am System Silberoxyd/Chromoxyd (G. Schneeberg) hervorgehoben. In ihnen wird gezeigt, dass es offenbar eine für die Katalyse optimale Sauerstoffbindungsfestigkeit gibt, d.h. sowohl zu geringe Bindungsfestigkeiten wie auch zu große zur Herabsetzung oder Vernichtung katalytischer Aktivität führen (sogenannte Glockenkurve). Da die Sauerstoffbindungsfestigkeit durch die Zweitkomponente beeinflusst werden kann, ist also auch eine Optimierung der katalytischen Eigenschaften auf diese Weise möglich.

Heute wissen wir, dass diese Korrelation immer dann gegeben ist, wenn im geschwindigkeits-bestimmenden Schritt der Oxydationsreaktion der Riss oder die Bildung einer Sauerstoffbindung zur Katalysatoroberfläche erfolgt. Auch mit diesen Arbeiten haben Rienäcker und seine Mitarbeiter mit ihren Forschungsergebnissen nicht nur im Zentrum des Erkenntnisfortschritts gestanden, sondern diesen auch in *sehr* grundsätzlichen Fragen mit bestimmt.

Seine großen Verdienste in Lehre und Forschung veranlassten das Plenum der Akademie, ihn 1953 – unter Umgehung der korrespondierenden Mitgliedschaft – direkt zum ordentlichen Mitglied der Akademie zu wählen.

Als es sich vier Jahre später als notwendig erwies, das Amt eines Generalsekretärs der Akademie einzurichten, wurde er vom Plenum zum ersten Inhaber dieses Amtes gewählt und übte es bis 1968 aus. In dieser Eigenschaft war er Geschäftsführer des Präsidiums und des Plenums, staatlicher Leiter der Mitarbeiter der Akademie und verantwortlich für die internationalen Beziehungen der Akademie.

Unter seiner maßgeblichen Mitwirkung wurde nicht nur die Zusammenarbeit mit den befreundeten Akademien der sozialistischen Länder vertieft und erweitert, sondern es wuchs auch das Interesse weltweiter Internationaler Organisationen an der Aufnahme von Wissenschaftlern der Akademie und der Akademie selbst.

Rienäcker hat sich wiederholt öffentlich zur Notwendigkeit ungehinderter enger und weltweiter Wissenschaftskontakte – und Kooperation geäußert und ist oftmals gegen die im Kalten Krieg damals übliche Behinderung und Diskriminierung von Wissenschaftlern der DDR durch künstliche und mutwillige Reisebeschränkungen aufgetreten. Als die DAW 1961 auf der IX. Generalversammlung des International Councils of Scientific Unions in London in diesen Rat aufgenommen wurde, war ihm, dem offiziellen Vertreter dieser Akademie, die Einreise nach England verweigert worden. Als er 1964 als international angesehener Katalyseforscher an dem III. Internationalen Katalysekongress in Amsterdam teilnehmen wollte, wurden er und seine Stellvertreterin im Institut durch das Alliierte Reiseamt in Westberlin daran gehindert.

In der zweiten Hälfte der sechziger Jahre verschlechterte sich sein Gesundheitszustand. Er litt an einer Kreislauferkrankung und musste sich außerdem im Mai 1968 einer Augenoperation unterziehen. Auf Empfehlung seiner Ärzte, bis zu seiner Pensionierung 1969 seine Tätigkeit auf die Institutsarbeit zu beschränken, bat er im gleichen Jahr um seine Entbindung vom Amt des Generalsekretärs der Akademie.

Für seine Verdienste als Forscher, Hochschullehrer und Wissenschaftsorganisator sind Günther Rienäcker sehr viele Ehrungen und Auszeichnungen des In- und Auslandes zuteil geworden, auf deren Aufzählung hier aus Zeitgründen verzichtet werden soll.

Das Bild von G. Rienäcker, das hier zu zeichnen versucht wurde, wäre aber unzulässig unvollkommen, wenn nicht auch seine Eigenschaften als Mensch und seine Leidenschaft zur Musik hier noch Erwähnung finden würden.

G. Rienäcker war sehr angenehm im Umgang mit anderen Menschen, er war selbstbewusst doch sehr gerecht und die Meinung anderer respektierend.

Gegenüber seinen Mitarbeitern wirkte er mehr durch sein persönliches Vorbild als durch lange Reden. Diese begegneten ihm mit großem Respekt und obwohl zu den meisten von ihnen, schon des oft großen Altersunterschiedes wegen, immer eine leichte Distanz bestand, war er gleichwohl umgänglich und bei entsprechenden Gelegenheiten auch gesellig und ausgelassen. Manchen gut gemeinten Spaß, den sich seine Mitarbeiter bei Feiern seiner runden Geburtstage mit ihm erlaubten, ertrug er geduldig und mit viel Humor.

Zu den großen Leidenschaften Rienäckers zählten die Musik und dies in einem Maße, das sich nicht allein durch passives Anhören von Konzerten oder Schallplatten befriedigen lässt. Musik bedeutete für ihn Selbermusikieren, nicht als Zeitvertreib sondern als ernste Arbeit und gemeinsam mit anderen. Es begann bereits als Jugendlicher in seinem Elternhaus, wo er den Gesang seiner Mutter auf dem Klavier begleitete und sich beide gemeinsam über viele Jahre hindurch fast das gesamte Liederwerk großer Komponisten wie Schubert und Brahms erarbeiteten. Neben dem Klavier beherrschte er ebenso die Flöte und die Oboe und spielte aber auch oft auf dem Cembalo und gelegentlich auch auf der Orgel. In seiner Freiburger Zeit war es das „Collegium musicum“ der Universität, mit dem er arbeitete, später dann in Göttingen setzte sich das aktive musikieren fort und in Rostock durfte er das sehr gute „Collegium musicum“ sogar selbst leiten. Diese fünf Jahre in Rostock zählte er nicht zuletzt wegen dieser Arbeit mit musikbegeisterten Studenten, Assistenten und Professoren zu den glücklichsten seines Lebens.

Trotz deutlich größerer beruflicher Belastung beteiligte er sich auch in seiner Berliner Zeit aktiv an dem Kreis „Chemiker musizieren“ der über viele Jahre jeweils in der Vorweihnachtszeit ein vielbeachtetes öffentliches Konzert gab.

Nach Beginn seines verdienten Ruhestandes im Jahre 1969 waren ihm noch 20 Jahre Lebensabend beschieden, den er nicht nur für die Musik nutzte. Viel Jahre besuchte er noch regelmäßig das jährliche Katalytikertreffen der DDR, das von ihm selbst aus der Taufe gehoben worden war und das – natürlich in veränderter Form – auch heute noch existiert. Noch manches Jahr hat er uns auf diesen Treffen durch sein großes Wissen immer wieder überrascht. Die heute noch Lebenden werden das nie vergessen.

Günther Rienäcker verstarb am 13.6.1989, genau einen Monat nach seinem 85. Geburtstag.

Auch in Zukunft werden sich Menschen, die seine Ideale teilen und seine Verdienste zu würdigen wissen, seiner erinnern.

## **Wortmeldungen zu den „Thesen“**

### **Gedanken zur ökologischen Transformation**

Die Thesen sind ein wichtiger Anstoß zur Diskussion eines ebenso wichtigen wie brisanten Themas. Die Formulierungen sind wohl in der Absicht, die Diskussion herauszufordern, von Polarisationen geprägt. Bei der Analyse derartiger Texte ist es nützlich, gesichertes Wissen von spekulativem zu trennen, was ich versuchen will. Die Ansichten werden auseinander gehen. Meine Aussage bezieht sich auf die naturwissenschaftliche Seite.

Sicher ist, dass die wertvollen Rohstoffe Öl, Erdgas, Kohle u. a. heute in einer Geschwindigkeit verbraucht werden, die ein Versiegen dieser Quellen verursacht. Wann dies geschieht, kann nur mit einer gewissen Fehlerbreite vorausgesagt werden. Empfehlenswert ist es aber, diese Ressourcen bereits jetzt möglichst zu schonen.

Richtig ist auch, dass ein großer Anteil der Weltbevölkerung von menschenunwürdigen Bedingungen noch zu befreien ist, was aber den Energiebedarf nicht reduziert. Einen weiteren sehr wesentlichen Energiebedarf würde die prognostizierte Verfahrensumstellung erfordern bis hin zur Eisengewinnung im Hochofen, zum Kalbbrennen und zur Zementproduktion. Ich halte es für unmöglich, dass in Zukunft ohne Stahl und Zement auszukommen ist. Alternative Prozesse würden einen hohen spezifischen Energieverbrauch aufweisen, da Rohstoffe mit geringeren Energiekonzentrationen bzw. geringeren Gehalten an Nutzkomponenten eingesetzt werden müssten.

Es ist noch nicht gelungen, den auf diese Weise noch steigenden Energiebedarf wissenschaftlich zu berechnen. Auch rationelle Energieausnutzung wird den steigenden Bedarf nicht kompensieren.

Die Sonne strahlt fast 19000 TW auf die Erde ein. Davon lebt die gesamte Biosphäre, und auch die Windenergie beruht schließlich darauf. Der Weltenergieverbrauch von 13 TW ist demgegenüber gering. Nur benötigt die Natur eben zum Aufrechterhalten aller Prozesse einen hohen Energieüberschuss. In der Natur sind die Prozesse auf Energieüberschuss ausgelegt, vgl. die Samenproduktion.

Natürlich ist es richtig und wichtig, die Energieerzeugung auf der Basis

erneuerbarer Energien voran zu treiben. Dass aber der Energiebedarf der Zukunft allein mit so erzeugten Energien zu befriedigen ist, wage ich zu bezweifeln. Hier kann ich der Spekulation nur die Spekulation entgegen setzen. Ich sehe nicht, dass die Aufgaben der Zukunft ohne Kernfusion zu bewältigen sind. In der Zwischenzeit dient die Kernspaltung als Überbrückung, was Asien schon in Angriff genommen hat. Deutschland ist ein sehr kleines Glied im Weltenergiebedarf.

Die Entsorgung der Kernkraftwerke darf für diese Zeit nicht vernachlässigt werden. Endlager in Salzstollen sind für mich nicht überzeugend. Die Radioaktivität muss tief in geologisch sichere Bereiche verbracht werden, wo Radioaktivität schon vorhanden ist und zur Geothermie beiträgt. Positiv ist die CO<sub>2</sub>-Freiheit dieser Energieproduktion.

Die Menschheit verfügt über ein mehrfaches atomares Vernichtungspotential, was sehr viel vernünftiger in Kernkraftwerken zur Energieerzeugung in der Zwischenzeit bis zur Fusionsrealisierung genutzt werden könnte.

*Lothar Kolditz*

### **Antwort auf den Kommentar zum Diskussionsbeitrag „Gedanken zur ökologischen Transformation“**

Die Bemerkungen zu meinem Diskussionsbeitrag zeigen, dass es mir nicht gelungen ist, den Kernpunkt meiner Ausführungen deutlich zu machen. Ich betone nochmals, dass es bei der Textanalyse vom Charakter der Thesen besonders darauf ankommt, gesichertes Wissen von spekulativem zu trennen. Zwar ist es nicht einfach, eine Meinung leidenschaftlich zu vertreten und gegenüber anderen Auffassungen tolerant und objektiv zu sein. Es muss aber immer wieder versucht werden, ich beziehe mich selbst voll ein.

Die Betrachtungen, die in den Thesen geäußert werden, sind Abschätzungen und stets mit einer Fehlerbreite versehen, die zum Teil erheblich ist. Es ist nicht objektiv, die Fehlerbreite der eigenen Meinung als gering und die der anderen Seite dagegen als erheblich hinzustellen, ohne dafür stichhaltige Gründe angeben zu können.

Zur Rohstoffverknappung gibt es Einschätzungen mit großen Spannweiten. Welcher Zeithorizont gilt, ist also nicht sicher vorauszusagen. Die Fehlerbreite muss zumindest zugegeben werden. Es ist auch nicht richtig, die Kernfusion auf der einen Seite ohne Realisierungschance darzustellen und auf der anderen Seite mit Zukunftsvisionen zu arbeiten, deren Realisierung naturgemäß auch noch nicht erwiesen sein kann.

Computergestützte Szenarien sind mit bestimmten Randbedingungen ge-

füttert und haben ebenfalls eine Fehlerbreite. Mit Änderung der Randbedingungen ändern sich auch die Ergebnisse. Auch hier ist bei der Beurteilung eine kritische Sicht angebracht. Natürlich kann über die Ergebnisse diskutiert werden, aber doch nicht so, als wären dies wissenschaftlich exakt gesicherte Tatsachen.

Um Fehlbeurteilungen vorzubeugen, sei darauf hingewiesen, dass unter Weltenergiebedarf nicht die jetzige Energienutzung, sondern der Zukunftsbedarf auf Grund der Bevölkerungszahl zu verstehen ist.

Bei der Entsorgung atomarer Sprengköpfe ist natürlich nicht an schnelle Brüter gedacht. Es gibt noch zahlreiche andere Reaktortypen, und zwar sehr geeignete. Ich halte außerdem den Satz „Wer gegen Kernwaffen ist, muss auch gegen Kernenergie sein“ für nicht vertretbar.

Im Übrigen verweise ich auf meinen Beitrag „Rohstoffe und Energie“, Sitzungsberichte Heft 1/2, 1994, S. 105–115.

*Lothar Kolditz*

### **Bemerkungen zu den Thesen „Zur ökologischen Transformation“ von Gert Blumenthal und Dietrich Spänkuch**

Mit ihrer Ausarbeitung setzen sich die Verfasser für den weiteren Ausbau der Versorgung mit erneuerbaren Energien ein. Diese Zielstellung muß unterstützt werden. Allerdings ist stark zu bezweifeln, daß die alleinige oder auch nur vorrangige Nutzung der erneuerbaren Energien der „Königsweg“ zur sicheren Versorgung der Menschheit mit Energien und Rohstoffen auf dem heutigen Niveau sein kann. Diese Problematik ist außerordentlich komplex und erfordert eine allseitige, interdisziplinäre Untersuchung. Die Schlußfolgerungen daraus müssen realistisch sein.

*Als erstes müssen wir folgendes feststellen:*

1. Die Menschheit insgesamt wie auch ihre organisierten Teile, die Nationen, benötigen für ihr Überleben und ihre weitere Entwicklung die natürlichen Ressourcen der jeweiligen Lebensräume. Bei der Nutzung der Ressourcen wird der Lebensraum mehr oder weniger stark beeinflusst. Die Übernutzung und/oder die Nutzung der Ressourcen ohne Beachtung der Reaktionen der Natur führen zu nachhaltigen Schäden der Lebensräume bis zur Vernichtung des Charakters der Region, Lebensraum sein zu können. Diese generelle Erkenntnis führt jedoch selten zu praktischen Konsequenzen. Bis heute wird sogar vernachlässigt, die Widerstandskraft der Natur gegenüber anthropogenen Einflüssen zu erforschen.
2. Während eine einzelne Nation ihren Lebensraum erweitern und auch die

Ressourcen aus den Lebensräumen anderer Nationen nutzen kann, besitzt die Menschheit als Ganzes nur einen einzigen Lebensraum, die Erde, genauer gesagt: die Geosphäre. Die Menschheit hat bisher noch keinen wirksamen Mechanismus gefunden, wie sie ihren gemeinsamen Lebensraum im Interesse aller ihrer Teile nutzen und schützen kann.

3. Die Eigenschaft eines natürlichen Vorkommens oder einer Naturerscheinung, Ressource zu sein, hängt ab von der technologischen Fähigkeit und dem ökonomischen Interesse des Menschen, dieses Vorkommen (diese Erscheinung) aufzufinden, auszubeuten und in nachfolgenden Stufen des wirtschaftlichen Prozesses zu verwerten. Die Bewertung eines Vorkommens (einer Erscheinung) als Ressource ändert sich folglich laufend.
4. Unter allen Arten von Ressourcen genießen in der modernen Gesellschaft die Energieressourcen die höchste Wertschätzung. Der Einsatz von Energie vervielfacht die Stärke des einzelnen Menschen wie der ganzen Nation. Ohne Einsatz von Energie kann keine der anderen Ressourcenarten erschlossen und genutzt werden.
5. Zumindest in den Industrienationen sind die Energieressourcen derart billig, daß sie in hohem Maße verschwendet werden. Gleichzeitig sind für die Energiewirtschaft typisch die hohen ökonomischen Aufwendungen und als Folge davon die langfristigen Strategien für die Erneuerung der Anlagen und für denkbare Veränderungen.
6. In technologischer Hinsicht ist Erdöl heute die wertvollste Ressource, insbesondere als universell einsetzbarer Träger von Primärenergie. (Als Sekundärenergie ist am wertvollsten die Elektroenergie.) Die Erdölvorkommen enthalten Sonnenenergie, die im Laufe von geologischen Zeiträumen (d. h. Jahrtausenden) durch biologische und geologische Prozesse akkumuliert wurde. Eine vergleichsweise hohe Akkumulation von Sonnenenergie läßt sich in kurzen Zeiträumen (Jahren oder kürzer) mit heutigen Technologien nicht erreichen. Der tatsächliche Umfang der Erdölvorkommen ist nicht bekannt, auch nicht der tatsächliche Umfang der Vorkommen, die mit den heutigen technologischen Möglichkeiten auffindbar und gewinnbringend nutzbar sind. Es gilt lediglich als sicher, daß der Gesamtvorrat endlich groß ist und in absehbarer Zeit aufgebraucht sein wird. Wann das sein wird, kann nicht exakt prognostiziert werden. Der Zeitpunkt wird entscheidend von egoistischen Interessen von (natürlichen wie juristischen) Individuen wie ganzer Nationen mitbestimmt.

*Mit welchen Entwicklungen muß gerechnet werden?*

1. Die Entwicklung aller Nationen wird zunehmend von der Ideologie der

Industrienationen geprägt, die auf ständiges Wachstum, den Fortschritt in allen gesellschaftlichen Bereichen setzen. Dieses Wachstum ist untrennbar mit dem ständig wachsenden gewinnbringenden Einsatz von Ressourcen, darunter der Energieressourcen, verbunden. Die Industrienationen kennen bisher kein anderes Mittel zur Steuerung der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Prozesse als den Profit.

2. Das Wirtschaftswachstum erfolgt auf lange Zeit regional unterschiedlich, und zwar im kompromißlosen Wettbewerb, wobei die heute bereits industriell entwickelten Nationen entscheidende Vorteile besitzen und diese rücksichtslos nutzen, während die Entwicklungsländer ganz wesentlich benachteiligt sind. Die Industrieländer werden auch künftig sich den Zugriff auf die für sie erforderlichen Ressourcen mit ökonomischen, politischen und notfalls militärischen Mitteln sichern. Die mit der Ausbeutung der Naturressourcen verbundenen Beeinträchtigungen der Naturräume werden, wenn es „hart auf hart“ kommt, sowohl von den Industrieländern wie auch den Entwicklungsländern weitgehend in Kauf genommen werden.
3. Parallel zum Wirtschaftswachstum wächst global die Bevölkerung, regional gesehen jedoch praktisch nur in den Entwicklungsländern, während die einheimische Bevölkerung in den meisten Industrieländern abnimmt. Die Wohlstandsansprüche werden in allen Nationen aus den Industrieländern übernommen. Sie wachsen und verstärken dadurch in allen Ländern den Druck auf die Lebensräume und die Intensität der Ressourcennutzung noch mehr.
4. Das Wirtschaftswachstum beruht in den Industrieländern vorwiegend auf der Entwicklung und Anwendung von ökonomisch vorteilhafteren Technologien. Aufwendige und kostenintensive Produktionen werden aus den Industrieländern zunehmend in Entwicklungsländer verlagert, was für diese ökonomisch vorteilhaft, aber ökologisch belastend wirkt. Die Aspekte der Ressourceneinsparung und der Schonung des Naturraumes spielen bei der Technologieentwicklung zumeist nur dann eine Rolle, wenn damit zugleich ökonomische Vorteile verbunden sind. (Ich bin mir nicht sicher, daß diese beiden Aspekte bei der Entwicklung von Technologien zur Nutzung der erneuerbaren Energien entscheidend sind.)
5. Die sichere Versorgung mit Energie besitzt für alle Nationen, besonders für die Industrienationen, derart hohe Bedeutung, daß sie dabei keinerlei Risiken, welcher Art auch immer, eingehen können. Das betrifft sowohl die Versorgung mit Trägern der Primärenergie (Erdöl, Erdgas, Kohle, Uranerz) durch Förderung im eigenen Lande und durch Import aus mehreren Förderländern (Pipelines, Verbundnetze) wie auch die Wahl der An-

lagen zur Wandlung der Primär- in Sekundärenergie (Elektroenergie, Heizstoffe, Vergaserkraftstoffe), dabei auch der Zwischenspeicher für die Zeiten der Spitzenbelastung), wie auch die Anlage von ausreichenden Vorräten an Energieträgern für Krisenzeiten. Alle diese Einrichtungen müssen sicher sein in technischer Hinsicht, gegenüber Naturkatastrophen wie auch gegen militärische und terroristische Anschläge.

Die sichere Energieversorgung ist eine Frage höchster politischer Brisanz, was bedeutet, daß alle relevanten politischen Entwicklungen ständig verfolgt werden müssen.

6. Die Energieversorgung erfolgt zumindest in den Industrieländern auf einem hohen technologischen Niveau. Jede angestrebte Umstellung der Energieträgerbasis wird an diesem Niveau gemessen, unabhängig davon, welche Argumente für die Umstellung geltend gemacht werden. Es ist sehr unwahrscheinlich, daß die weitaus überwiegende Mehrheit der Verbraucher eine irgendwie geartete Absenkung dieses Niveaus hinnehmen wird.

Die Leibniz-Sozietät hat sich nach ihrer Konstituierung als eingetragener Verein in den Jahren 1992 bis 1995 mit dem komplexen Problemkreis „Energieversorgung, Chemie und Umwelt – globaler Wandel“ intensiv befaßt. Es ist an der Zeit, die damals erarbeitete wissenschaftliche Einschätzung zu überprüfen.

*Heinz Kautzleben*

### **Antwort auf den Entwurf der Thesen zur ökologischen Transformation vom 6. Juli 2004**

Wir halten es für sehr wichtig, dass sich die Leibniz-Sozietät dieser wichtigen Problematik stellt und gravierende Änderungen in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft fordert, um Öl, Erdgas und Kohle wegen ihrer Bedeutung für die künftige Stoffwirtschaft zu erhalten und gleichzeitig die Emission von Kohlendioxid zu reduzieren. Sehr unterstützen wir auch die Forderung nach gleichmäßiger Entwicklung der Energieversorgung für alle Regionen der Welt. Deshalb begrüßen wir die Initiative sehr.

Allerdings sind wir nicht mit allen Aussagen des Entwurfs einverstanden.

1. Zur Erreichung der genannten Ziele muss man wohl in erster Linie eine intensive Forschung und Entwicklung auf allen alternativen Gebieten fordern und nicht einige Gebiete von vorn herein ausschließen.

Noch existieren keine Konzepte, mit denen die angestrebten Ziele erreicht werden können.

Insbesondere ist bei den im Entwurf favorisierten Technologien der Materialaufwand so hoch, dass – auch in Anbetracht der Notwendigkeit doppelt investieren zu müssen, um Erzeugung und Verbrauch zu jeder Zeit in Übereinstimmung zu bringen, – eine breite Einführung auf dem zur Zeit absehbaren technischen Niveau schwer möglich erscheint. Besonders sollte gefordert werden, dass alle Lösungen von der internationalen Gemeinschaft getragen und in allen entwickelten Industriestaaten ein ökologisch und ökonomisch verträglicher Energiemix entwickelt wird, der auch für die Entwicklungsländer Perspektiven bietet.

Keinesfalls sollte Deutschland auf einen Sonderweg getrieben werden, der die Wirtschaft unseres Landes im internationalen Wettbewerb stark benachteiligt.

Deshalb sollten wir eine offene und intensive Forschung, Entwicklung und Applikation in alle Richtungen fordern und nicht einige Richtungen vorverurteilen oder als Königswege favorisieren!

2. Es wäre aus unserer Sicht fahrlässig, Nuklearmethoden (Fission und Fusion) von vornherein auszuschließen.

Die Erreichung einer hohen Sicherheit bei der Spaltung ist seit Tschernobyl bereits erheblich fortgeschritten und hat zu Reaktorkonzepten geführt, bei denen solche Katastrophen schon aus physikalischen Grundprinzipien heraus ausgeschlossen werden können. (Die einfache Verdammung der Kernspaltung nach Tschernobyl entspräche einem Verbot der Chemieindustrie nach historischen Unfällen, bspw. in Indien!)

Schließlich kann die Fusion mit recht großer Wahrscheinlichkeit langfristig sichere und wirtschaftliche Konzepte bieten. Das wird aber nur passieren, wenn zielstrebig geforscht und nicht vorzeitig ideologische Barrieren gegen eine Nutzung aufgebaut werden.

Im bisherigen Entwurf wird die Kernenergietechnik mit sehr pauschalen Argumenten, die zum Teil mehr ideologisch als wissenschaftlich klingen, sogar von Forschung und Entwicklung ausgeschlossen. Dies kann sich als großer Fehler herausstellen. Leider ist Deutschland schon kaum noch in der Lage, in diesem Prozess eine Rolle zu spielen, was wir sehr bedauern.

*K.-F. Alexander, G. Albrecht, U. Hofmann, W. Karthe, N. Langhoff, J. Leonhardt, D. Nebel, M. Oettel, B. Wilhelmi*

## **Nachruf auf Samuel Mitja Rapoport**

Vorgetragen auf der Gedenkveranstaltung im Plenum der Leibniz-Sozietät am 16. September 2004

Die Leibniz-Sozietät trauert um ihren langjährigen Präsidenten (1993–1998) und Ehrenpräsidenten, den großen Biochemiker Prof. Dr. med. Dr. phil. Dr. h. c. mult. Samuel Mitja Rapoport, der im 92. Lebensjahr in den Morgenstunden des 7. Juli 2004 verstarb. Sein Wirken im letzten Lebensjahrzehnt trug entscheidend dazu bei, dass nach der Zerstörung der Wissenschaftsstruktur der DDR und Auflösung der Akademie der Wissenschaften durch private Initiative von Wissenschaftlern eine produktive Gemeinschaft von Wissenschaftlern in der Leibniz-Sozietät aufgebaut wurde. Ihre Arbeit bestimmen heute Wissenschaftler aus allen Erdteilen.

Rapoport hat sowohl als Wissenschaftler, Wissenschaftspolitiker, faszinierender Hochschullehrer und Verfechter für Frieden und Fortschritt Herausragendes geleistet.

Charakteristisch war für ihn ein außergewöhnliches Engagement, mit dem er auf Herausforderungen in seinem langen, oft schwierigen Leben reagierte. Um seine Entscheidungen rang er stets mit großer Sachkenntnis, Disziplin und Wahrheitsliebe.

Prägend waren für die Herausbildung seiner Persönlichkeit die 17 Jahre in Wien, wo er seit seinem 7. Lebensjahr lebte. Das politische und kulturelle Leben in dieser Stadt, die er liebte, prägte ihn nachhaltig. In der sozialistischen Arbeiterjugend erwarb er sich politisches Wissen und wurde zu einem überzeugten Sozialisten. In Wien begann er 1930 sein Medizinstudium und schloss es 1936 mit der Promotion ab. Von entscheidender Bedeutung für seine spätere berufliche Entwicklung war, dass er während dieser Zeit sowohl auf dem Gebiet der Chemie als auch der Medizin forschen konnte. Diese Tätigkeit legte den Grundstein für sein außergewöhnliches biologisches Verständnis. Seine wissenschaftliche Tätigkeit am Medizinisch-Chemischen Institut in Wien schulte seine analytischen Fähigkeiten, und er erkannte bei seinem Lehrer Otto von Fürth, welche entscheidende Rolle die Methodik bei der Lösung wissenschaftlicher Fragestellungen spielt. In dieser Periode begann er auch sich mit dem Stoffwechsel roter Blutzellen zu beschäftigen, ein Forschungs-

objekt, das er zeitlebens nicht mehr verlassen sollte. Der aufkommende Faschismus mit seinen politischen Folgen zwang ihn, Wien zu verlassen.

Ein einjähriges Forschungsstipendium an der Children's Hospital Research Foundation in Cincinnati erleichterte ihm den Schritt in die Emigration. In den USA fand er nicht nur Zuflucht, sondern lernte auch seine Frau Inge Syllm kennen, gründete eine Familie und wurde amerikanischer Staatsbürger. Darüber hinaus konnte er seine Forschungsarbeit erfolgreich fortsetzen. Zusammen mit seiner technischen Assistentin Jane Luebering, die sich in dem von ARTE ausgestrahlten Rapoport-Film so warmherzig an ihre gemeinsame Arbeit mit Rapoport erinnerte, entdeckte er den 2,3-Bisphosphoglyzeratweg (Rapoport-Luebering-Zyklus) und dessen Autoregulation. Aus der Erkenntnis der funktionellen Rolle des ATP und des 2,3-Bisphosphoglyzerates und deren Bedeutung für die Überlebensfähigkeit roter Blutzellen, entwickelte er das ACD-Medium, mit dem die Lagerfähigkeit von Blutkonserven von einer auf drei Wochen verlängert werden konnte. Für diese Leistung, die vielen Kriegsverwundeten das Leben rettete, erhielt er vom US-Präsidenten H.S. Truman das Certificate of Merit. Weiterhin widmete er sich wichtigen klinisch-chemischen Fragestellungen zum Wasser- und Elektrolytstoffwechsel. 1947 fand er im Rahmen einer Forschungsreise nach Japan heraus, dass der oft tödlich verlaufenden Kinderkrankheit Ekiri ein Kalziummangel zugrunde lag. Durch intravenöse  $Ca^{++}$  Injektionen konnten die Kinder gerettet werden. Die dabei geschlossene Freundschaft mit H. Yoshikawa hielt lebenslang. Ein Beispiel dafür ist die 1974 veröffentlichte Monographie „Cellular and Molecular Biology of Erythrocytes“.

Das Jahr 1950 brachte eine einschneidende Wende in das Leben der Familie. Inge und Mitja Rapoport konnten sich als Mitglieder der kommunistischen Partei der USA der Vorladung vor das McCarthy Committee nur durch ihre Teilnahme an einem Internationalen Pädiatriekongress in Zürich entziehen. Die Flucht von den USA nach Europa fiel ihnen schwer, denn sie verloren ihr Heim, ihre Freunde, ihre Arbeitsstätten, Inge war hochschwanger, und sie hatten 3 kleine Kinder. Der Wunsch, in Wien wieder Fuß zu fassen, gelang nicht; ebenso wurde eine Bewerbung in der Sowjetunion abgelehnt.

1952 nahm Rapoport die ihm angebotene Professur für Physiologische Chemie an der Medizinischen Fakultät (Charité) der Humboldt-Universität zu Berlin an und leitete das Institut 26 Jahre. Diese Entscheidung brachte der Familie eine neue Heimat und für ihn eine neue berufliche Herausforderung, die für die Biowissenschaft in der DDR zu einem Glücksumstand wurde. Viele Studenten erwarteten ihn mit Ungeduld und wurden nicht enttäuscht. Er

las nicht nur in stets überfüllten Hörsälen nahezu alle Vorlesungen in den ersten Jahren selbst, sondern bildete zugleich zielgerichtet ein Wissenschaftlerteam heran, mit dem er neue Ausbildungskonzeptionen erarbeitete. Dazu zählte 1953 die Einführung von Seminargruppen, mit denen Wissenschaftler wöchentlich mehrere Stunden arbeiteten. Die Ausarbeitung von Modellseminaren, in denen biochemische Inhalte mit klinischen Fragestellungen verbunden wurden, dienten dazu, den Studenten zu verdeutlichen, wie wichtig für die Medizin das Erkennen funktionaler Zusammenhänge ist. Das Praktikum modernisierte er gemeinsam mit H. J. Raderecht und erweiterte das Methodenspektrum mit dem Ziel, die Beobachtungsgabe und Kritikfähigkeit der Studenten zu schulen. Auf diese Weise konnten 1000 Studenten pro Jahr auf hohem wissenschaftlichem Niveau ausgebildet werden. Die in der Studentenausbildung gemachten Erfahrungen fanden Eingang in das Buch „Physiologisch-Chemisches Praktikum unter Berücksichtigung Biochemischer Arbeitsmethoden und Klinisch-Chemischer Gesichtspunkte“ und in das 1962 erschienene Lehrbuch „Medizinische Biochemie“. Beide Bücher erschienen bis Ende der 80er Jahre in hohen Auflagen. Das Lehrbuch wurde in mehrere Sprachen übersetzt und zu einem internationalen Standardwerk.

Mit dem Neubau des Berliner Institutes 1957 verbesserten sich die Voraussetzungen für anspruchsvolle wissenschaftliche Arbeiten. Die Themen konzentrierten sich vorrangig auf rote Blutzellen in ihren verschiedenen Differenzierungs-, Reifungs- und Alterungsstadien als Forschungsobjekt. Zu den wichtigsten Arbeiten, die in dieser Zeit unter seiner Leitung durchgeführt wurden, zählten:

- die Reinigung und Charakterisierung von Schlüsselenzymen der Glykolyse und die Ausarbeitung des mathematischen Modells zur Regulation der Glykolyse normaler und enzymdefekter Erythrozyten. Diese Ergebnisse bildeten die Grundlage für die Formulierung einer allgemein gültigen Kontrolltheorie des Stoffwechsels.
- Charakterisierung des Mitochondrienabbaus, die Entdeckung, Reinigung und Klonierung der 15-Lipoxygenase
- die Aufklärung biochemischer und molekularer Mechanismen bei der Differenzierung und Reifung des erythroiden Systems und die Entdeckung der ATP-abhängigen Proteolyse
- und philosophische Arbeiten.

666 wissenschaftliche Publikationen belegen die Produktivität und disziplinierte Arbeit dieses kreativen Wissenschaftlers. Mit 74 Jahren fasste er viele dieser Ergebnisse in der Monographie „The Reticulocyte“ zusammen.

1996 war er zum letzten Mal Koautor einer wissenschaftlichen Arbeit zum Thema: „Oxygenation of membranes by mammalian lipoxigenase“. Die wissenschaftliche Arbeit verlief stets in einem kontinuierlichen Gedankenaustausch und in kritischer Auseinandersetzung, unter Mitwirkung aller Mitarbeiter und Studenten, die als Doktoranden oder Diplomanden beteiligt waren. Das hohe Niveau der von ihm zusammen mit seinem Freund, dem Pharmakologen Fritz Jung, alle 3 bis 4 Jahre veranstalteten internationalen Berliner Erythrozytensymposien, war ein Ausweis für den Erfolg der Forschungsarbeit unter seiner Leitung.

Rapoport verband in vorbildlicher Weise das Ideal der Einheit von Forschung und Lehre und war deshalb stets bemüht, die Bedingungen zur Ausbildung des wissenschaftlichen und medizinischen Nachwuchses sowie für die interdisziplinäre Arbeit zu verbessern. Er wirkte an der Reform des naturwissenschaftlichen Unterrichts an den gemeinbildenden Schulen der DDR mit und setzte einen spezifischen Ausbildungsweg zum Biochemiediplom für begabte Chemie- und Biologiestudenten nach Abschluss des Grundstudiums an dem von ihm geleiteten Institut durch. Er war auch maßgeblich an der Reform des Medizinstudiums in der DDR beteiligt und der Durchsetzung eines höheren Niveaus der ärztlichen Weiterbildung. Zur Intensivierung der notwendigen interdisziplinären Arbeit setzte er an der Humboldt-Universität die Gründung einer Biowissenschaftlichen Fakultät durch, deren erster Dekan er war. Dies war ein wichtiger Schritt, um die von ihm in der Biologieprognose aufgezeigten Ziele, die auch heute kaum etwas von ihrer Aktualität eingebüßt haben, an der Universität in Form von langfristigen wissenschaftlichen Konzeptionen umsetzen zu können. All diese Aktivitäten bildeten eine Einheit mit seiner Tätigkeit als Mitglied des Forschungsrates der DDR und des Rates der Medizinischen Wissenschaften, durch die er die Profilierung der Biowissenschaften und der Medizinischen Forschung mitbestimmte.

1962 gehörte er in logischer Konsequenz der politischen Entwicklung in den zwei deutschen Staaten zu den Gründungsmitgliedern der Biochemischen Gesellschaft der DDR und war von 1971–1979 ihr Vorsitzender. Gemeinsam mit K. Lohmann und H. Frunder setzte er 1964 die Aufnahme der Biochemischen Gesellschaft in die FEBS und 1967 in die IUBM durch und wurde 1967 Delegierter in der General Assembly der IUBM und im FEBS-Council. Die Biochemie war die erste wissenschaftliche Gesellschaft der DDR, die die internationale Anerkennung erlangte.

1978 war Rapoport Präsident des FEBS-Kongresses in Dresden und danach 2 Jahre Chairman der FEBS. Der FEBS-Kongress in Dresden war nicht

nur der größte wissenschaftliche Kongress, der bis dahin in der DDR durchgeführt wurde, sondern verriet auch eindeutig Rapoport's Handschrift. Die Tagung unterschied sich von allen vorher und danach durchgeführten FEBS-Tagungen durch die Einheit von Wissenschaft, Kultur und Traditionspflege.

Rapoport war ein hoch begabter, schnell kombinierender, disziplinierter, streitlustiger, charismatischer Mann, der Wissenschaft mit großer Liebe und Leidenschaft betrieb. Obwohl stets fordernd und oft ungeduldig mit der Geschwindigkeit des wissenschaftlichen Fortschritts, kennzeichnete stets Achtung von Freunden und Schülern die Arbeitsatmosphäre in seiner Umgebung.

Rapoport wurde aber nicht nur verehrt, sondern sparte auch nicht mit der Anerkennung von Leistungen anderer bedeutender Forscher. Zu ihnen zählte u. a. Otto Warburg. Beide Wissenschaftler achteten sich sehr. Obwohl sehr unterschiedliche Persönlichkeiten, stimmten sie in der Logik der Formulierung wissenschaftlicher Fragestellungen überein und in der Akribie des methodischen Vorgehens. Rapoport freute sich deshalb stets über Warburgs Besuch in der Hessischen Straße. Einen besonderen Anlass dazu bot die Diskussion in der Bibliothek mit dem russischen Arzt Jegorow, der nach seinem Raumflug die ersten Befunde zum Verhalten des Kalziumspiegels im Blut während des Raumfluges einem kleinen Kreis von Wissenschaftlern vorstellte. Während dieser turbulenten Diskussion waren beide in ihrem Element.

Rapoport verfügte aber auch über die Fähigkeit, neue Forschungsrichtungen zu initiieren und zu unterstützen, auch wenn er nicht mehr an den Arbeiten direkt teilnahm. Ein Beispiel dafür ist der Aufbau der Gentechnik am Institut für Molekularbiologie an der Akademie in Berlin-Buch durch seine Schüler Sinaida Rosenthal, Charles Coutelle, Tom Rapoport, Hartmut Liebischer u. a. Dieses Forscherkollektiv stellte als erstes international humanes rekombinantes Insulin her. Leider wurde die Sonde nicht durch die Industrie der DDR genutzt, da zu diesem Zeitpunkt in allen Ländern klinisch noch Schweineinsulin eingesetzt wurde. Die Anregung zur Aufnahme des humanen Insulinprojektes ging, was ich hervorheben möchte, von Inge Rapoport aus. Sie spielte die wichtigste Rolle in seinem Leben. Sie war die ihn stets verstehende Partnerin und als Mutter der 4 Kinder der Mittelpunkt der Familie. Sie war aber auch immer seine kritische Diskussionspartnerin in politischen und, wie das Beispiel belegen soll, auch in wissenschaftlichen Fragen. Mit Recht war er stolz darauf, dass seine kluge Frau den ersten Lehrstuhl für Neonatologie in Deutschland erhielt. Ebenso stolz war er aber auch auf die Leistungen seiner Kinder und Enkel und seiner Schüler.

Geboren Anfang des 20. Jahrhunderts, das durch die Folgen von 2 Weltkriegen und dem Holocaust immer noch gekennzeichnet ist, setzte er seine ganze Persönlichkeit dafür ein, seine Ideale als Sozialist in der DDR zu verwirklichen. Er hat viel geschaffen und fand große Anerkennung. Um so schmerzlicher traf ihn, dass beim Anschluss der DDR an die BRD die Chance einer auf positiven Erfahrungen in beiden deutschen Staaten fußenden Integration vertan wurde. Zu den mehr als 80% abgewickelten Wissenschaftlern zählten auch sein ältester Sohn und viele seiner Schüler. Es schmerzte ihn, erleben zu müssen, wie leicht Fakultätsräte deutscher Universitäten die von ihnen vorgeschlagenen Berufungen ohne Widerstand durch die Politik kippen ließen. Trotzdem gab er seine Vision nie auf, dass Wissenschaftler sich für den menschlichen Fortschritt zusammenschließen und Lösungen zur Erhaltung des Friedens und für bessere Lebensmöglichkeiten entwickeln werden. Diese Vision sollten wir als Vermächtnis im Andenken an ihn bewahren. Liebe Inge, Dir und Deiner großen Familie sind wir in Trauer verbunden.

Danuta ist heute mit gekommen, um Dich an Mitjas Kindheit zu erinnern, da er selbst Cello spielte und auch später dieses Instrument besonders liebte.

Gisela Jacobasch

*Eine sichere Versorgung künftiger Generationen mit Energie und Rohstoffen wird immer problematischer, auch für große Teile der heute lebenden Menschheit ist sie nicht gewährleistet. Offensichtlich gibt es keine einfachen Wege zur Fundierung der Prognosen oder zur Entwicklung neuer oder besserer Technologien, ganz zu schweigen von Lösungen für die immensen sozialen und politischen Probleme, die aus dem global ungleichen Zugang zu Energieträgern, Rohstoffen und Technologien resultieren. Entsprechend differenziert sind die Annäherungen an mögliche Lösungen. Die Leibniz-Sozietät hat sich schon in der Vergangenheit mit dieser sehr komplexen Thematik beschäftigt. Nun wurde ein Projekt ins Leben gerufen, über das Heinz Kautzleben nachfolgend berichtet. In seiner Sitzung am 9.9.04 hat das Präsidium beschlossen, die von unseren Mitgliedern Gert Blumenthal und Dietrich Spänkuch erarbeiteten und inzwischen auf unserer Homepage und in „Solarzeitalter“, 16, 3 (2004) veröffentlichten Thesen „Zur ökologischen Transformation“ auch in den „Sitzungsberichten“ als Auftakt zu einer neuerlichen Diskussion zu veröffentlichen. Gleichzeitig drucken wir mehrere kurze Wortmeldungen ab. Der Fortgang der Diskussion wird in den „Sitzungsberichten“ entsprechend deren Möglichkeiten dokumentiert. Detailliertere Argumentationen bleiben einstweilen der Homepage vorbehalten. (Die Redaktion)*

### **Projektaufgabe „Sichere Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen“**

(als Teil des Projekts „Öffentlichkeitswirksamer Erkenntnisgewinn durch Interdisziplinarität als Aufgabe von Wissenschaftsakademien im 21. Jahrhundert“)

Die in der Aufgabe formulierte Problematik wird bereits seit einigen Jahrzehnten in aller Welt intensiv diskutiert. In den letzten Jahren hat die Diskussion an Schärfe zugenommen. Die Leibniz-Sozietät hat sich in den neunziger Jahren mit der Problematik eingehend befaßt und darüber in den „Sitzungsberichten der Leibniz-Sozietät“ berichtet. Verwiesen sei auf die publizierten Vorträge von Karl Lanius, Karl-Heinz Bernhardt und Wolfgang Böhme, Alfred Zimm, Lothar Kolditz, Günter Albrecht und Dieter Nebel, Wolfgang Schirmer, Karl-Friedrich Alexander, Helmut Abel, Gerd Friedrich und Klaus Steinitz, Siegfried Franck, Günther Vormum, Günter von Sengbusch u. v. a. Die Liste ist nicht vollständig.

Es ist an der Zeit, daß die dabei erarbeiteten Aussagen überprüft und aktualisiert werden. Die in der Sozietät laufenden Diskussionen zu ausgewählten Fragen müssen erweitert werden, um einerseits der Komplexität der

Problematik gerecht zu werden und andererseits die Kompetenz der Sozietät zu interdisziplinärer Betrachtung wirksam zu machen. Die Zusage des Berliner Wissenschaftssenators, daß die wissenschaftliche Tätigkeit der Sozietät in den Jahren 2004 und 2005 mit je 20.000 € gefördert werden soll, bietet nach Auffassung des Präsidiums dafür Möglichkeiten, die mit der Formulierung der Projektaufgabe genutzt werden sollen.

Im Antrag an die Senatsverwaltung zur Freigabe der Fördermittel ist folgende Kurzbeschreibung zur Aufgabe enthalten:

„Sichere Versorgung der Menschheit mit Energie und Rohstoffen  
Forschungsprogramm, Konferenz 2005

Die Leibniz-Sozietät arbeitet seit Jahren an der wissenschaftlichen Begründung des Konzeptes zur nachhaltigen Entwicklung sowohl im regionalen wie auch im globalen Maßstab, was nur durch interdisziplinäre Analysen und Synthesen gelingen kann. Schwerpunkt ist die Suche nach unter den bestehenden politischen, ökonomischen und wissenschaftlich-technischen Bedingungen praktikablen Lösungswegen zur gegenwärtig und auf lange Sicht sicheren Versorgung mit Energie und Rohstoffen. Besonders schwierig ist es dabei, den Platz der erneuerbaren Energien zu bestimmen.“

Die Bearbeitung der Projektaufgabe erfolgt in der akademiespezifischen Weise: durch Präsentation und Diskussion von Vorträgen in wissenschaftlichen Sitzungen und/oder durch Korrespondenz, vornehmlich mit elektronischer Post über das Internet. Die Ergebnisse sollen in der für das Jahr 2005 angestrebten wissenschaftlichen Konferenz der Sozietät präsentiert und anschließend in einem Sonderband der „Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät“ publiziert werden, der bis zum Jahresende 2005 fertiggestellt werden soll.

In der Anlaufberatung zur Bearbeitung am 07.10.2004 wurden folgende Fragen besprochen und dazu Vorschläge ausgearbeitet, die vom Präsidium am 14.10.2004 bestätigt wurden:

- Was wäre der spezifische, ihrer Kompetenz angemessene Beitrag der Sozietät zur Diskussion dieser Problematik, die gegenwärtig von vielen, darunter sehr leistungsfähigen Organisationen geführt wird?
- Welche Fragenkomplexe müßten in der Sozietät unbedingt betrachtet werden?
- Wie kann die Bearbeitung der Projektaufgabe wissenschaftlich gesteuert und praktisch organisiert werden?

Die angeregte Aussprache führte zu folgenden Aussagen und Ergebnissen:

1. Die Projektaufgabe erfordert, daß die Sozietät ihren Überblick über den aktuellen Stand der Wissenschaft auf dem Gesamtgebiet im ausreichenden Maße ergänzt. Das kann in speziellen Informationsveranstaltungen

- gen erfolgen, zu denen als Vortragende auch Gäste gewonnen werden können.
2. Die Sozietät kann einen spezifischen Beitrag dadurch leisten, daß sie die zahlreich vorhandenen Szenarien aus komplexer Sicht und möglichst unbelastet durch kommerzielle und/oder ideologische Vorurteile bewertet. Ihre Einschätzungen, welche von den Szenarien sich unter den absehbaren politischen, ökonomischen und ideologischen Bedingungen durchsetzen werden, müssen wissenschaftlich begründet werden. Unterschiedliche Auffassungen, die in der Sozietät nicht ausgeräumt werden können, müssen offen dargelegt werden.
  3. Der Begriff „Rohstoffe“ in der Formulierung der Projektaufgabe soll auf diejenigen natürlichen Stoffe eingeschränkt werden, die sowohl als Energieträger wie auch als Rohstoff in der stoffwandelnden Industrie genutzt werden. Die Nutzungskonflikte sind bei der Einschätzung der Szenarien von großer Bedeutung.
  4. Der Begriff „Sichere Versorgung“ deutet sowohl auf die Fragen der Ressourcenverknappung als auch auf die Fragen der sog. nachhaltigen Nutzung der Ressourcen hin. Insbesondere bei den Betrachtungen zur Nachhaltigkeit der Nutzung spielen die zeitlichen und geographischen Dimensionen eine große Rolle. Die Sozietät muß bei ihren Aussagen sowohl die technogenen als auch die geologischen Veränderungen betrachten und ebenso die globalen wie auch die regionalen Auswirkungen. Besondere Aufmerksamkeit gebührt der Situation in Deutschland und Mitteleuropa.
  5. In der gegenwärtigen Diskussion wird vielfach behauptet, daß die nachhaltige Nutzung der Energie- und Rohstoffressourcen alle gesellschaftlichen Prozesse beeinflusst. Die Sozietät kann dazu fundierte Aussagen treffen, wenn sich ihre Mitglieder, die auf dem Gebiet der Sozialwissenschaften kompetent sind, an der Bearbeitung der Projektaufgabe beteiligen. Wahrscheinlich müssen auch einige kompetente Gäste für die Mitwirkung gewonnen werden.
  6. Zu den Fragen der erneuerbaren Energien wird in der Sozietät gegenwärtig bereits intensiv, dabei auch kontrovers diskutiert. Diese Diskussion muß weitergeführt werden, um den Platz der erneuerbaren Energien in der Gesamtproblematik global und in Deutschland zuverlässiger bestimmen zu können. Die Aktivitäten des Leibniz-Institutes für interdisziplinäre Studien sollten in der Sozietät angemessen beachtet werden.
  7. Da in den verschiedenen Ländern bezüglich des Platzes der Kernenergie in der langfristig sicheren Versorgung mit Energie und Rohstoffen, die zugleich Energieträger sind, sehr unterschiedliche Strategien verfolgt

werden, muß die Sozietät sich umgehend mit allen relevanten Fragen intensiv befassen. Dazu gehört auch die doppelte Nutzung der Kernenergie für militärische und für zivile Zwecke.

Das Präsidium hat am 14.10.2004 dem Vorschlag zugestimmt, zur Bearbeitung der Projekt-aufgabe in den Jahren 2004 und 2005 einen Ad-hoc-Arbeitskreis (AK Energie-Rohstoff-Versorgung) zu bilden. Jedes interessierte Mitglied der Leibniz-Sozietät ist herzlich eingeladen, im Arbeitskreis mitzuwirken. Die Beteiligung von kompetenten Gästen ist ebenfalls erwünscht.

Der AK Energie-Rohstoff-Versorgung wird vorwiegend auf dem Wege der Korrespondenz tätig sein, vornehmlich durch den Austausch von Informationen, individuellen Arbeitsergebnissen und Meinungen zwischen allen Beteiligten per elektronischer Post über das Internet. Hinzu kommen Beratungen an den regulären Sitzungstagen des Plenums und der Klassen sowie einige spezielle Arbeitsberatungen des Arbeitskreises. Der Arbeitskreis bereitet auf diese Weise eine wissenschaftliche Konferenz der Leibniz-Sozietät für das 2. Halbjahr 2005 vor und die Publikation der erreichten Ergebnisse in einem Sonderband der „Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät“ bis zum Ende des Jahres 2005. Die beiden Klassen werden gebeten, darüber hinaus in die Pläne der wissenschaftlichen Sitzungen im Jahre 2005 einige Vorträge zu relevanten Themen aufzunehmen.

In der Anlaufberatung wurden Eckpunkte für die Bearbeitung der Projektaufgabe bestimmt.

Als nächste Maßnahme wird ein Workshop am 10.12.2004 abgehalten, in dem sich die Beteiligten zu allen oben genannten Fragestellungen äußern sollten und in dem die Schwerpunkte für die weitere Bearbeitung der Projektaufgabe in der Sozietät bis zum Ende des Jahres 2005 festgelegt werden. Zu den Schwerpunkten sollte gehören, daß wissenschaftlich fundierte Aussagen zu folgenden Fragekomplexen gefunden werden:

- Kann Deutschland es sich leisten, auf die fortgeschrittene Kernenergetik zu verzichten?
- Was trägt Deutschland zum anthropogenen Einfluß auf das globale Klima bei, gemessen an der im Eozän insgesamt beobachteten Entwicklung des globalen und regionalen Klimas, und welche Auswirkungen in Mitteleuropa sind dabei zu erwarten?
- Welchen Handlungsspielraum hat Deutschland bei der nachhaltigen Nutzung der fossilen Energieträger und der erneuerbaren Energien?
- Wie sichert Deutschland die Versorgung mit Rohstoffen, die zugleich Energieträger sind?

Bericht von Heinz Kautzleben

Gert Blumenthal und Dietrich Spänkuch

## Thesen „Zur ökologischen Transformation“

### Vorbemerkung

Die Autoren, Mitglieder der Leibniz-Sozietät, unterbreiten der Öffentlichkeit die folgenden Thesen.

Zu dem vorliegenden Text haben konstruktiv beigetragen die Herren Ralph Lücke, Gerhard Öhlmann, Klaus Steinitz (alle Mitglieder der Leibniz-Sozietät) sowie der Vorstandsvorsitzende der Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V. (FEE), Herr Eberhard Oettel. Bisher haben sich 46 Mitglieder der Leibniz-Sozietät, z.T. mit Änderungsvorschlägen, die meist berücksichtigt wurden, an der Sozietäts-internen Aussprache beteiligt. Allen Diskussionspartnern sei für ihr Interesse und ihre Mitarbeit gedankt.

Das Präsidium der Leibniz-Sozietät hat am 9. September 2004 über diese Thesen beraten und empfahl deren Veröffentlichung als Herausforderung zur weiteren Diskussion um kontroverse Auffassungen zu existentiellen Fragen innerhalb und außerhalb der Leibniz-Sozietät.

Beteiligen Sie sich bitte an der Diskussion auf unserer Homepage  
<http://www.leibniz-sozietat.de>!

Zu diesem Zweck senden Sie bitte Ihre E-Mails gleichzeitig an die Adressen  
[debatte@leibniz-sozietat.de](mailto:debatte@leibniz-sozietat.de) und [gertblumenthal@arcor.de](mailto:gertblumenthal@arcor.de)

*All diejenigen, die mit Geist und Ziel dieser Thesen einverstanden sind, bitten wir zuzustimmen, daß sie in beabsichtigten Veröffentlichungen dieser Thesen als „Unterzeichner“ benannt werden. Teilen Sie bitte diese Ihre Genehmigung mit, indem Sie uns mindestens Ihren Titel, Namen, Vornamen, Wohn- oder Arbeitsort zusenden.*

Mit Sorge beobachten die Unterzeichner dieser Thesen, wie die in den letzten Jahren unter großen Mühen erreichten Fortschritte zur Sicherung einer globalen ökologischen Stabilität in zunehmendem Maße kurzfristigen Wirtschaftsinteressen geopfert werden sollen, wodurch die notwendige Fortsetzung der ökologischen Transformation der Gesellschaft auch in der Bundesrepublik Deutschland und in Europa ernsthaft bedroht ist.

Wir, die Unterzeichner dieser Thesen, Wissenschaftler der Leibniz-Sozietät und anderer Institutionen wie auch ökologisch interessierte Bürger allgemein, wenden uns, im Bewusstsein unserer gesellschaftlichen Verantwortung, an die Öffentlichkeit, um damit Bestrebungen und Aktionen entgegenzutreten, die verstärkt mit unseriösen Methoden und unter Ignorierung wissenschaftlicher Ergebnisse wie praktischer Erfolge den weiteren zielstrebigem Ausbau der Erneuerbaren Energien zu behindern trachten. Beispiele dafür sind die hinlänglich bekannten Angriffe einiger Medien gegen die weitere Entwicklung der Regenerativenergien, die Obstruktion bestimmter Energieversorgungsunternehmen gegen die Einspeisevergütung, die Praktizierung von Anschlußverweigerungen und Netzentgelt-Erhöhungen durch einige Netzbetreiber u.a.m.

Wir sind davon überzeugt, daß wir mit unserem Engagement im Sinne des Leitmotivs „Theoria cum praxi“ des Begründers der Sozietät, Gottfried Wilhelm Leibniz, handeln.

Die Unterzeichner gehen von folgenden Thesen aus:

### **Die Transformation zu einer ökologischen Energie- und Stoffwirtschaft**

Die menschliche Gesellschaft steht vor einer ihrer folgenschwersten Entscheidungen:

Sie muß im globalen Maßstab in historisch kurzer Frist den Übergang zu einem neuen Typ der Energie- und Stoffwirtschaft vollziehen. Diese Wirtschaft muß nachhaltig<sup>1</sup> sein, um den jetzt Lebenden wie auch den kommenden Generationen eine Sicherung der Grundbedürfnisse und ein Leben in Frieden, Gleichberechtigung, Würde und Gesundheit zu ermöglichen.

Dieser Übergang bedeutet einen tiefen Einschnitt in das Leben und Denken der Gesellschaft, er wird alles verändern, Produktions-, Konsumtions- und Lebensweise und trägt alle Züge einer Revolution<sup>2</sup>. Bereits 1972 leistete der Club of Rome in seinem ersten Bericht eine wichtige Vorarbeit hierzu<sup>3</sup>. Die Transformation zu einer neuen Energie- und Stoffwirtschaft stellt die größte Herausforderung für die Menschheit in diesem Jahrhundert dar und ist zugleich eine große Chance für den Übergang auf einen Pfad nachhaltiger

- 
- 1 Volker Hauff, „Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht.“, Greven-Verlag Eggenkamp 1987.
  - 2 Alexander King, Bertrand Schneider, „Die globale Revolution, ein Bericht des Rates des Club of Rome“, Spiegel spezial Nr. 2/1991.
  - 3 Dennis L. Meadows u.a., „Die Grenzen des Wachstums“, Deutsche Verlags-Anstalt Stuttgart 1972.

Entwicklung, für die Gestaltung einer menschenwürdigen und zukunftsfähigen Gesellschaft.

Der Kampf um den Zugriff auf Erdöl- und Erdgasvorkommen war in der Vergangenheit und ist gegenwärtig eine der Hauptkriegsursachen, und er wird in Zukunft das Wohlergehen von immer mehr Völkern, ja sogar die Sicherheit ganzer globaler Regionen in Frage stellen. Insofern ist die Politik zur Etablierung und Verbreitung von Regenerativenergien Friedenspolitik.

### **Die objektiven Zwänge für die Transformation**

Die Entscheidung zu dieser Transformation ist unumgänglich und dringlich. Dafür sprechen folgende Gründe:

- Es besteht die Gefahr, daß der auf der Basis fossil-nuklearer Energieversorgung immer weiter wachsende anthropogene Energieumsatz und die damit verbundenen Stoffumsätze die Biosphäre irreversibel schädigen und das Klimasystem destabilisieren<sup>4</sup>.
- Immer offensichtlicher werden die Gefahren für das Leben durch die Abfälle der Zivilisation, das sind in erster Linie die Treibhausgase Kohlenstoffdioxid und Methan<sup>5</sup>, darüber hinaus aber auch eine schnell wachsende Anzahl chemischer Produkte (deren akute, Langzeit- und Kombinationswirkungen auf die Biosphäre schon längst nicht mehr beherrscht werden), der steigende Umfang gesundheits- und umweltschädlicher Schwermetallverbindungen wie auch die radioaktiven Belastungen aus der Kernenergie-Technik.
- In absehbarer Zeit, innerhalb weniger Generationen, werden nicht nur fossile Kohlenstoff-Ressourcen, zunächst Erdöl und Erdgas, sondern auch Uranerz (zu jetzigen Konditionen) wegen Erschöpfung der Vorkommen nicht mehr zur Verfügung stehen<sup>6</sup>.

Je länger der Übergang in Richtung auf das „ökologische Zeitalter“ hinausgeschoben wird, desto höher wird der Aufwand sein, den die Gesellschaft für diesen unvermeidlichen Prozeß wie auch für die Sanierung der durch die

---

4 Hans-Peter Dürr, „Die Zukunft ist ein unbetretener Pfad“, Verlag Herder Freiburg i. Br. 1995, S. 161 ff.

5 Hans-Joachim Schellnhuber, „Erdsystemanalyse und Koevolution“, Festvortrag Leibniz-Tag 2004, Berlin 01.07.04.

6 Colin J. Campbell, Frauke Liesenborghs, Jörg Schindler, Werner Zittel, „Ölwechsel! Das Ende des Erdölzeitalters und die Weichenstellung für die Zukunft“, Deutscher Taschenbuch Verlag München, 2. Aufl. 2003.

konventionelle Technik geschädigten Umwelt einmal leisten muß. Je länger noch „business as usual“, desto umfassender die irreparablen Schäden<sup>7</sup>.

## Die Instrumente der Transformation

### *Solidarität und Lebensweise*

Ein großer, weiter wachsender Anteil der Weltbevölkerung lebt unter menschenunwürdigen Bedingungen. Etwa 2 Milliarden Menschen haben noch immer keinen Zugang zu Elektroenergie, 1,4 Milliarden leiden unter Trinkwassermangel, und in vielen Ländern gibt es keine hinreichende Gesundheitsversorgung. Diese ständig den Weltfrieden bedrohende Zweiteilung unserer Welt geht eindrucksvoll aus den Zahlen der Tab. „Weltdaten“<sup>8</sup> hervor.

**Weltdaten**

	Industrieländer	Nicht-Industrieländer		
		Entwicklungsstand		
		hoch	mittel	schwach
<b>Bevölkerung</b> (5,9 Md.)	24	9	35	32
<b>BIP</b> (32 Bill. \$)	80	11	8	1
<b>Primärenergieverbrauch</b> (410 EJ)	66	11	19	4
<b>CO<sub>2</sub>-Emission</b> (23,1 Md. t)	65	10	20	5

Zahlen in Prozent; in Klammern: Weltgröße 1998 absolut;

**BIP** Bruttoinlandsprodukt

Der Kampf der Betroffenen für ihre Befreiung aus der Armut, für ein gleichberechtigtes Leben in Würde für sich und ihre Kinder ist zutiefst berechtigt und eine elementare, auf Dauer nicht niederzuhaltende Kraft, deren Wirkungen das Leben in immer weiteren Gebieten der Erde prägt.

7 Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers, „Die neuen Grenzen des Wachstums“, Deutsche Verlags-Anstalt Stuttgart 1992.

8 Joachim Nitsch u.a. (DLR, Wuppertal Inst., Ifeu), „Erneuerbare Energien“ Hrg.: BMU, Berlin 2004, S. 13.

Es ist aus sachlichen und ethischen Gründen unmöglich, die in den Industrieländern vorherrschende Lebensweise mit ihren z.T. zerstörerischen Konsequenzen, ihrer Philosophie des „ewigen Wachstums“ und der Leugnung natürlicher Grenzen, als Vorbild für die gesamte Erdbevölkerung darzustellen und global zu verbreiten. Würde die heutige Erdbevölkerung den spezifischen Ressourcenverbrauch der Nordamerikaner annehmen, benötigte die Menschheit drei Planeten Erde<sup>9</sup>. Um den Entwicklungsländern zur Verringerung ihres ökonomischen Abstands zu den Industrieländern ein höheres Wachstum zu ermöglichen, müssen diese ihren absoluten Ressourcenverbrauch und die davon ausgehende Umweltbelastung in den nächsten fünfzig Jahren um ein Mehrfaches reduzieren.

Deshalb müssen vor allem in den Industrieländern Wege zu einer zukunftsfähigen Lebensweise energisch eröffnet und beschritten werden, in der aktive Solidarität mit allen in Armut Lebenden, mit allen Unterdrückten und Entrechteten ein Grundbedürfnis ist.

In Ländern der Armut, des Hungers und der Unterdrückung die ökologische Wende ohne die Beseitigung der sozialen Ursachen des Raubbaus an der Natur herbeiführen zu wollen, ist eine Illusion! Ohne tiefgreifende Fortschritte bei der globalen Lösung der sozialen Frage sowie bei der Verringerung der Kluft zwischen Nord und Süd wird es auch keine globale Lösung der ökologischen Probleme geben.

### ***Ressourcenproduktivität***

Auf fast allen Feldern technischer Energiewandlung bestehen relativ einfach und kostengünstig durchführbare, gleichermaßen ressourcen- wie klimaschonende Maßnahmen darin, die Effizienz der Wandlung und Nutzung von Energie zu erhöhen und sparsam damit umzugehen. Die hier noch zu erschließenden Potentiale sind riesig, werden aber noch längst nicht in vollem Umfang wahrgenommen<sup>10</sup>. Energieeffizienz durchgreifend und breit angelegt zu erhöhen, muß zu einer ständigen, unverzichtbaren Aufgabe der ökologischen Transformation werden – erforderlich und geeignet, die Einführung von Regenerativenergien vorzubereiten und zu erleichtern. Schritte dieser Art müssen Vorrang haben vor der Errichtung neuer Kraftwerke.

Auch in der Stoffwirtschaft ist Effizienzerhöhung erforderlich. Die Stoffströme müssen bereits heute vermindert und auf hohem technischen Niveau

9 M. Wackernagel, W. Rees, „Our ecological footprint“, New Society Publ., Gabriola Island, BC, Philadelphia, PA, 1996

10 Ernst Ulrich von Weizsäcker, Amory B. Lovins, L. Hunter Lovins, „FAKTOR VIER“, Droemersch Verlagsgesellschaft Th. Knaur Nachf. München 1997.

möglichst zum Kreislauf geschlossen werden, wobei Logistiko-optimierungen und elektronisch gesteuerten Verkehrskonzepten eine hohe Bedeutung für den Abbau von Umweltbelastungen zukommen wird.

### **Regenerativenergien**

Die zukunftsfähige Energieversorgung der Gesellschaft kann nur auf den fließenden Energien der Natur beruhen, auf Sonne, Wind, Wasser, Biomasse, Meeresströmung und -wellen sowie Erdwärme<sup>11</sup>. Das ist der Zustand der „regenerativen Vollversorgung“. Dieser Zustand ist realisierbar,

- weil das Potential der Regenerativenergien unerschöpflich ist und den Bedarf selbst einer weiter stark anwachsenden Erdbevölkerung bei weitem zu decken vermag: Beispielsweise überträgt allein die Sonnenstrahlung eine Leistung von etwa 18 000 TW auf die Kontinente unserer Erde (und eine Nutzung der Sonnenenergie auch auf den Meeresflächen ist denkbar). Im Vergleich dazu entspricht der Welt-Primärenergieverbrauch 1999 nur 13 TW. Zusätzlich aber stehen noch die anderen natürlichen Quellen zur Verfügung: Die kinetische Energie des Windes, die kinetische und potentielle Energie des Wassers, die thermische Energie der Weltmeere sowie die Energien der Biomasse und der Erdwärme. Die Gesamtheit der natürlichen Energieströme entspricht rund dem 3 000fachen des derzeitigen jährlichen Weltenergieverbrauchs.
- weil Lösungsmöglichkeiten für die Probleme, die mit der Nutzung mancher regenerativer Quellen verbundenen sind, wie Energiefluktuationen, niedrige Energie-Flächendichten, das Erfordernis effizienter Energiespeicherung u. a., heute bereits vorhanden oder als künftige Ergebnisse wissenschaftlicher Forschung schon erkennbar sind.

Die Unterzeichner erinnern daran, daß schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Nobelpreisträger Wilhelm Ostwald (Korrespondierendes Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften) und Svante Arrhenius<sup>12</sup> in bewunderungswürdiger Weitsicht derartige Forderungen erhoben haben.

Die Vollversorgung mit Regenerativenergien kann nicht mit einem einzigen Wandlertyp allein verwirklicht werden. Es ist vielmehr eine Vielzahl von Wandlertypen dafür einzusetzen, dezentral strukturiert, den jeweiligen lokalen Gegebenheiten optimal angepaßt, vernetzt und gesteuert durch eine leistungsfähige Systemtechnik. Autarke Energieversorgungskonzepte wie in

11 Hermann Scheer, „Sonnen-Strategie - Politik ohne Alternative“, Piper Verlag München, 2. Aufl. 1998.

12 Svante Arrhenius, : „On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground“, Philosophical Magazin, Ser.5, 41 (1896), 237–276.

Jüde bei Göttingen sowie in den 3 000 in der Bundesrepublik bereits existierenden energieautarken Häusern sollten als Führungsbeispiele entwickelt werden und höchste Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit erfahren.

Die Energietechnik des ökologischen Zeitalters ist, anders als die gegenwärtig betriebene Fossil-Nuklear-Technik, fehlertolerant und terrorismussicher. Sie arbeitet emissionsneutral bzw. nahezu emissionsfrei. Großflächige Havarien oder gar lokal und zeitlich weitreichende Katastrophen sind ausgeschlossen.

Regenerativenergien werden zuweilen noch mißverstanden als gerade ausreichend für die Nischenversorgung<sup>13</sup>. Der Regenerativenergie-Technik kommt aber vielmehr die Bedeutung einer Schlüsseltechnologie dieses Jahrhunderts zu. Die Versorgung mit Regenerativenergien ist der Kern der Nachhaltigkeit. Wie nicht anders zu erwarten, wirft sie eine Vielzahl neuer, komplizierter Fragen auf. Darum ist eine Forschungsstrategie der Energiewende auszuarbeiten und abgestimmte Forschungsprogramme für die Minderung des Energiebedarfs, die Erhöhung der Effizienz der Energiewandlung, die weitgehende Deckung des Energiebedarfs aus regenerativen Energiequellen sowie für Energiespeicherung aufzustellen. Die Finanzmittel für die entsprechenden Forschungsrichtungen sind möglichst schnell massiv zu erhöhen.

Gegenwärtig besteht, innerhalb eines engen Zeitfensters, die seltene Chance, in der Bundesrepublik Deutschland die fossil-nukleare Energiebasis durch die Einführung von Regenerativenergien abzulösen: Hier müssen in den nächsten zwanzig Jahren überalterte Kraftwerkskapazitäten von etwa 40 GW substituiert werden.

Die Etablierung von Regenerativenergien darf von den Industrieländern nicht allein als Mittel eigener Bedarfsdeckung gesehen werden. Vielmehr bieten Regenerativenergie-Wandler auf Grund ihrer modularen, dezentralen und netzvariablen Charakteristik die Möglichkeit, das Lebensniveau in der Dritten Welt durchgreifend zu verbessern und die drückende Abhängigkeit dieser Länder von immer teurer werdenden Fossilenergie-Importen zu beseitigen – eine humanistische Verpflichtung für alle Industrieländer. Das bevölkerungsreichste Land unseres Planeten, China, hat bereits auf Regierungsebene Interesse an der umfassenden Nutzung der Techniken Regenerativer Energien signalisiert.

---

13 „Deutsche Energieforschung und Energiepolitik auf dem Prüfstand“, Thesenpapier der Leopoldina, Leopoldina Nachrichten Nr. 10, Beilage der Naturwissenschaftlichen Rundschau, 57. Jahrgang, Heft 3 (2004), 1–3.

Eine gleichberechtigte Kooperation mit Ländern des Sonnengürtels beim Aufbau und bei der Nutzung einer dort zu errichtenden Regenerativenergie-Basis läßt Vorteile für beide Seiten erkennen: Entwicklung einer industriellen Basis mit der dazugehörigen technischen Intelligenz und Facharbeiterschaft für die Länder des Südens und Energieexporte aus diesen Ländern für eine sichere Versorgung des Nordens.

### ***Regenerative Stoffversorgung (Stoffressourcen)***

Noch zu wenig ist in das Bewußtsein der Öffentlichkeit getreten, daß mit der Erschöpfung der fossilen Kohlenstoff-Ressourcen auch eine wichtige Quelle für die stoffliche Versorgung von Industrie und Gesellschaft versiegen wird.

Die deshalb notwendige Umwälzung ist wahrscheinlich noch schwieriger vorstellbar als die energetische. Aus Erdöl und Erdgas hergestellte Zwischen- und Endprodukte sind aus dem modernen Leben nicht mehr wegzudenken: Kunststoffe (Baumaterialien, Möbel, Konstruktionselemente, Autoteile, Textilien, Folien, Verpackungsmaterialien), Schmieröle, Lacke und Farben, Klebstoffe u.a. All diese Produkte enden über kurz oder lang durch Verbrennen, Verrotten oder Vergären als Kohlenstoffdioxid – das klimaschädliche Treibhausgas.

Ebenfalls Klimaschutzgründe könnten es u.U. der Metallurgie und der Chemie-Industrie verbieten, weiterhin Koks als Reaktionspartner einzusetzen, z.B. zur Eisengewinnung im Hochofen. Zu prüfen sind auch die Zukunftsaussichten anderer großindustrieller Prozesse, die massenhaft Kohlenstoffdioxid emittieren, wie das Kalkbrennen und die Zementproduktion.

Ob die gegenwärtig diskutierte Kohlenstoffdioxid-„Sequestrierung“ (Verpressen in den Untergrund) einen Ausweg bietet, ob die Biomasse dem doppelten Druck der energetischen und der stofflichen Nutzung standhalten kann oder ob nicht auch Verfahren zur chemischen Nutzung des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids anzuwenden sind – all das sind offene Fragen, anspruchsvolle Herausforderungen für Wissenschaft und Technik, zu deren Beantwortung wir mit unseren Mitteln beitragen wollen.

### **Die gesellschaftliche Diskussion**

Die hier dargestellten Probleme und Entwicklungen sind komplex und greifen nicht nur tief in das Leben der gegenwärtigen Gesellschaft ein, sondern betreffen vor allem die kommenden Generationen. Darum dürfen der Gedankenaustausch darüber und die notwendigen Entscheidungen nicht allein Naturwissenschaftlern, Technikern und Politikern überlassen bleiben. Vielmehr

ist auch das Wort der Sozial- und Geisteswissenschaftler, der Mediziner und der außerwissenschaftlichen Öffentlichkeit, wie Gewerkschaften, Bürgerinitiativen, Nichtregierungsorganisationen, der Journalisten und der Kirchen, einzufordern und zu berücksichtigen.

Durch egoistische Wirtschaftsinteressen bestimmte Desinformation, erfahrungsresistente, verharmlosende Technikgläubigkeit und Bedenkenlosigkeit, Tendenzen von Technokratie wie auch billige Panikmache jeder Art verzögern den Transformationsprozeß. Derartigen Auffassungen ist darum, wissenschaftlich begründet, entgegenzutreten.

Wissenschaftler und Techniker sollten eine ihrer vornehmsten Aufgaben darin sehen, die Bevölkerung ehrlich und rückhaltlos über alle eventuellen Risiken technischer Entwicklungen zu informieren und außerdem den erforderlichen Sachverstand und die Urteilsfähigkeit der Bevölkerung zu entwickeln.

Wir, die Unterzeichner, rufen Wissenschaftler innerhalb und außerhalb der Leibniz-Sozietät sowie alle Gleichgesinnten auf, sich diesen Thesen anzuschließen und gemeinsam mit uns sich in den Prozeß des Meinungsaustausches wie auch der aufklärerischen und wissenschaftlichen Arbeit zur Förderung der ökologischen Transformation einzubringen. Wir halten derartige Aktivitäten angesichts der eingangs erwähnten politischen Aktionen gegen die ökologische Wende für dringend notwendig! Angst lähmt – Sorge mobilisiert.