

**TEKST NR 139**

**1987**

**Machbarkeit  
nichtbeherrschbarer Technik  
durch Fortschritte  
in der Erkennbarkeit  
der Natur**

**Bernhelm Booß-Bavnbeek  
Martin Bohle-Carbonell**

**TEKSTER fra**

**IMFUFA ROSKILDE UNIVERSITETSCENTER**  
INSTITUT FOR STUDIET AF MATEMATIK OG FYSIK SAMT DERES  
FUNKTIONER I UNDERVISNING, FORSKNING OG ANVENDELSER

IMFUFA, Roskilde Universitetscenter, Postboks 260, DK-4000 Roskilde  
Bernhelm Boß-Bavnbeek, Martin Bohle-Carbonell  
MACHBARKEIT NICHTBEHERRSCHBARER TECHNIK DURCH  
FORTSCHRITTE IN DER ERKENNBARKEIT DER NATUR  
IMFUFAtekst nr. 139/1987, 24 sider, ISSN 0106-6242

---

**Zusammenfassung.** Erfahrungen mit mathematischen Methoden in Naturwissenschaft und Technik werden vermittelt. Die Sicherheit und die Unzuverlässigkeit mathematischer Berechnungen und die Gründe dafür werden behandelt; Machbarkeit ohne Verstehen und Kontrolle wird gezeigt, aber auch die Sensibilität von Mathematik und Physik für die innerfachlichen Risiken im Grenzbereich unseres gegenwärtigen Wissens. Aus der Einschätzung von Fortschritten in der mathematischen Modellierung und Simulation und in anderen Bereichen der Naturerkenntnis und den dadurch ermöglichten Neuerungen in Technik, Politik und Alltag wird eine Verschärfung des Widerspruchs zwischen Machen und Beherrschen und die Notwendigkeit einer Neuorientierung unseres Denkens, Diskutierens und Handelns abgeleitet.

**Machbarkeit nichtbeherrschbarer Technik  
durch  
Fortschritte in der Erkennbarkeit der Natur**

BERNHELM BOOSS-BAVNBK, MARTIN BOHLE-CARBONELL  
Für Glen Pate, Lehrer und Freund

GLIEDERUNG

- 1 Einleitung
- 2 Zuverlässigkeit und Unzuverlässigkeit mathematisch-naturwissenschaftlicher Berechnungen
- 3 Verschiedenartigkeit der Qualität mathematisch-naturwissenschaftlichen Wissens
- 4 Machbarkeit ohne Beherrschbarkeit
  - A Diffusionsgleichung: Vom ad-hoc-Einzelwissen zur theoretischen Einbettung
  - B Theorielose Praxis
  - C Menschliche Erkenntnisschranken
  - D Problemlösung ohne "Erfassung der Situation"
  - E Betonierung von Lösungsverfahren
  - F Technikromantik, KI und Realität
- 5 Absolute Erkenntnisschranken?
- 6 Gesellschaftliche Ethik wissenschaftlich-technischer Veränderungen
  - A Unterschiedliche Risikobegriffe
  - B Wie soll es weitergehen?

---

"Zu Umwälzungen in den heutigen Naturwissenschaften", Internationale Konferenz, Wuppertal 25./26. April 1987, Bericht an die Arbeitsgruppe 1 über "Naturwissenschaften, Philosophie und Lösung globaler Probleme der Menschheit"; zur Veröffentlichung in "Marxistische Studien - Jahrbuch des IMSF 13, II, Frankfurt M., 1987.

**1 Einleitung.** Auf den folgenden Seiten wird von mathematisch-naturwissenschaftlichen Methoden und Ergebnissen die Rede sein. Das wird für manche Leser mühsam sein, Nachschlagen einzelner Begriffe im Lexikon oder in alten Schulbüchern erfordern und weitere Fragen auslösen. Einige werden auch fragen, ob sich der Aufwand lohnt, ob man nicht die Erörterung der Fachprobleme den Fachleuten überlassen und von den Autoren schneller lesbare, leichter verständliche und universell anwendbare erkenntnistheoretische und politische Verallgemeinerungen und Folgerungen verlangen kann. Doch sowenig wie es Aufgabe der Marxisten war, Arbeiterbewegung und fortschrittliche Intelligenz mit den Anstrengungen einer wissenschaftlichen Theorie der Gesellschaft zu verschonen, kann es heute darum gehen, den Bürger, Funktionär oder Gesellschaftswissenschaftler vor naturwissenschaftlich-technischem Grundwissen zu bewahren.

Vorschnelle Verallgemeinerung ist mit einem systematischen Fehler behaftet: Je größer die Entfernung vom Gegenstand ist, desto leichter läßt sich der Philosoph (so kritisch er sich auch gibt) dazu verführen, aus der Unbegrenztheit unseres mathematisch-naturwissenschaftlichen Erkenntnisvermögens auf die Beherrschbarkeit der Technik zu schließen, *wenn* nur günstige gesellschaftliche Voraussetzungen, Demokratie, Sozialismus, Frieden und ein gewisser Wohlstand vorliegen. Je näher man dem Gegenstand ist, desto einschränkender sind aber die Bedingungen, um Zweifel der Naturwissenschaftler, Ingenieure und Techniker (so verliebt sie auch in ihr Spielzeug sind) schon an der bloßen technisch-naturwissenschaftlichen Beherrschbarkeit der Technik auszuräumen.

Das war nicht immer so. Am Anfang unseres Jahrhunderts war die Vorstellung auch unter Mathematikern und Naturwissenschaftlern noch weit verbreitet: Wenn wir nur etwas mehr wüßten, hätten wir alles im Griff. Heute wird das kein Fachmann mehr im Ernst behaupten. Mit dem explosionsartigen Zuwachs an mathematisch-naturwissenschaftlich-technischen Erkenntnissen wurden nämlich handfeste Erfahrungen gemacht.

**GESELLSCHAFTLICH:** Die Fortschritte in der Erkennbarkeit der Natur, die Erweiterung der konkreten Naturerkenntnis und des Arsenal der Theorien, Methoden und Instrumente weiteten den Horizont des technisch Machbaren und tatsächlich Gemachten ins Unermeßliche aus. Die Paarung von hochspezialisiertem Fachwissen mit Beschränktheit und Rücksichtslosigkeit hat zu einer Lawine neuer Probleme, zu der katastrophalen Situation geführt, daß wir heute in großen gesellschaftlichen Bereichen am Rande unserer Erkenntnis hantieren.

**NATURWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCH:** Je mehr wir wissen, desto mehr Bereiche der Unkenntnis wurden sichtbar. Noch jede neue wissenschaftlich-technische Errungenschaft ist von niederschmetternden Erfahrungen mit der Komplexität von isolierten, menschengeschaffenen technischen Objekten begleitet. Die komplexen Materialeigenschaften einfacher Legierungen, die Wirkungsweise bescheidener Programme der Wirtschaftsinformatik, die Zuverlässigkeit von Space Shuttle und SDI lassen sich nicht vorhersagen. Diese - im Vergleich zur Komplexität der globalen Fragen - läppischen Systeme erweisen sich als technisch nichtbeherrschbar für ihre

eigenen Schöpfer.<sup>1</sup> Deshalb gibt es keinen Raum mehr für die Vorstellung, daß unsere gewohnte Art der Gestaltung des Wechselverhältnisses zwischen Mensch, Technik und Natur beherrschbar wäre - wo wir die vielfältigen Komponenten nicht einmal überschauen oder abschätzen und damit auch nicht kontrollieren können.

Auf der Grundlage unserer Berufserfahrung mit mathematischen Methoden in Naturwissenschaften und Technik: mit Sicherheit und Unzuverlässigkeit mathematischer Berechnungen (Abschnitt 2) und den Gründen dafür (Abschnitt 3), mit Machbarkeit ohne Verstehen und Kontrolle (Abschnitt 4), mit der Sensibilität von Mathematik und Physik für die innerfachlichen Risiken im Grenzbereich unseres gegenwärtigen Wissens (Abschnitt 5) plädieren wir für eine Neuorientierung unseres Denkens, Diskutierens und Handelns (Abschnitt 6).

Wir danken W. Coy (Bremen), J. H. Jensen (Roskilde) und G. Pate (Hamburg) und einer Anzahl weiterer Genossen, Freunde und Kollegen für Beratung bei der Abfassung des Manuskripts.

**2 Zuverlässigkeit und Unzuverlässigkeit mathematisch-naturwissenschaftlicher Berechnungen.** Während die Bedeutung mathematisch-naturwissenschaftlicher Argumente überall wächst<sup>2</sup>, bleibt das öffentliche Denken über die Glaubwürdigkeit von mathematischen Modellen bei Schablonen stehen. Wie können wir ein realistischeres Verhältnis zu mathematisch-naturwissenschaftlichen Berechnungen gewinnen?

**THESE 1.** *Auf mathematische Berechnungen kann und muß man sich verlassen.*

Diese These gilt für den Kranführer auf der Baustelle: Nach den Hebelgesetzen ist " $Kraft * Kraftarm = Last * Lastarm$ ". Daraus läßt sich eine Begrenzung für zu hebende Lasten ableiten, so daß der Kran nicht umkippen und das Leben der Bauarbeiter gefährden kann. Die These gilt auch für das Konsortium, das einen Nachrichtensatelliten auf eine geostationäre Umlaufbahn um die Erde hochschießen will. Die schon Newton bekannten Gravitationsgesetze erlauben die Berechnung der Höhe für die Umlaufbahn mit der für die Sicherheit der Geldanlage des Konsortiums erforderlichen Präzision. Wer sein Leben oder sein Geld lieb hat, darf These 1 nicht bezweifeln.

Und doch kennt der Sicherheitsbeauftragte auf der Baustelle die Gefahr von Windstößen und bugsierenden Lastzügen, der Anlageberater die Häufigkeit von Explosionen der Trägerraketen, wodurch die Anwendung der mathematischen Berechnungen außer Kraft gesetzt wird. Genauer:

---

<sup>1</sup> Unser Thema ist das Verhältnis von Handeln und *Erkenntnis*; d.h. wir untersuchen einstweilen nicht die gesellschaftliche, sondern die gedankliche und technische Beherrschbarkeit von durch die Menschen geschaffenen Gegenständen und Verhältnissen. Ohne technische Beherrschung, ohne die gedankliche Erfassung aller möglichen und wesentlichen Bedingungen und Folgerungen ist es kaum sinnvoll, über gesellschaftliche Beherrschbarkeit, über gesellschaftliche Kontrolle, über eine vernünftige gesellschaftliche Beschlußfassung über Einsatz oder Verzicht auf technisch Machbares zu spekulieren.

<sup>2</sup> L. L. Smarr, An approach to complexity: numerical computations, Science 228 (1985), 403-470.

THESE 2. *Auf mathematische Berechnungen kann und darf man sich nicht verlassen.*

Die These gilt für den Fischteichbesitzer: Man kann Grundgleichungen über die Sterblichkeit von Fischen und ihre Gewichtszunahme aufstellen und daraus auf mathematischem Weg - ganz ähnlich wie bei der Satellitberechnung - die optimale Wartezeit bis zum Abfischen bestimmen. In der Praxis kann sich aber zeigen, daß eine u.U. erheblich kürzere oder erheblich längere Wartezeit doch rentabler ist. Nicht wegen eines Rechenfehlers, sondern weil unser Modell offensichtlich wesentliche Beziehungen nicht korrekt widerspiegelte. Dann ändert man eben die Werte und den Aufbau der Grundgleichungen, führt neue Größen ein, unterscheidet nach Arten, Altersklassen, Jahreszeiten, regionalen Besonderheiten und legt dieses nachjustierte und verfeinerte, aber deswegen nicht notwendig treffendere oder realistischere Modell den weiteren Berechnungen über Aussatz von Fischlaich, Abfischen und Rentabilität zugrunde, bis sich ein neuer Fehler zeigt, die eigenen Fische einer Infektion erliegen und die des Konkurrenten wegen einer geringfügigen Änderung der Fütterung plötzlich viel schneller zunehmen.<sup>3</sup>

These 2 bestätigte sich auch beim legendären Einsturz der Tacoma-Hängebrücke in den USA am 7. November 1940, vier Monate nach ihrer Einweihung. Die baustatischen Berechnungen und die Qualität der ausgeführten Bauarbeiten waren nicht zu beanstanden. Fachfremde Strömungsmechaniker der Automobil- und Flugzeugindustrie fanden dann erst den Grund: Der Winddruck auf die aus Sicherheitsgründen besonders kräftig ausgelegte Stahlkonstruktion hatte zu rythmischen Schwingungen der Brücke geführt, die sich durch eine unglückliche Resonanz zum "Galopp" aufschaukelten. Mehr Sicherheit ließ sich nicht durch genauere Berechnungen oder bessere Qualität der Ausführung erreichen, sondern nur durch Überschreiten der zu engen Fachgrenzen.<sup>4</sup>

Ein anderes Beispiel spektakulären Versagens bieten die weltweit vernetzten Börsencomputersysteme. Hierbei gibt es zwei Aspekte. Der *Ausfall* des Londoner Börsencomputersystems am Tage der Inbetriebnahme im Oktober 1986 war noch ein für die Branche ganz normaler Vorgang, wie er überall bei der Entwicklung großer ziviler oder militärischer Informationssysteme auftritt, die nicht termingerecht fertiggestellt und deren Grundfunktionen nicht ausreichend vom Schreibtisch, sondern erst in der Installation und in Probeläufen bestimmt und eingestellt werden können.<sup>5</sup> Tatsächlich waren in London die Anforderungen an das Computersystem, nämlich eine genaue vertragliche Zugriffbreite für jeden Benutzer, wodurch eine Überlastung ausgeschlossen ist, richtig spezifiziert und nur nicht termingerecht installiert worden. Zur Vermeidung von Schadensersatzforderungen wurde allen Benutzern zunächst die volle Zugriffbreite zugeteilt, worauf das System abstürzte, da kein Modell der Überlastung und kein entsprechendes Notprogramm existierten.

<sup>3</sup> J. H. Jensen, *Matematisk modeller - vejledning eller vildledning?* Naturkampen 18 (1980), 14-22.

<sup>4</sup> M. Braun, *Differential Equations and Their Applications*, Springer, New York 1978, 167-169.

<sup>5</sup> Vgl. die umfangreiche Literatur zur technischen, mathematischen, physikalischen und datalogischen Kritik von SDI.

Viel dramatischer ist aber die Nichtvorhersagbarkeit der Wirkungsweise von *fertig installierten* und *"fehlerfrei"* arbeitenden Börsencomputersystemen. Genauere Untersuchungen über die Wirkungsweise von Rechnern im Börsenverkehr zeigen hier eine weitere Seite unserer These: Die immer bessere und schnellere Funktionsweise des einzelnen Börsenautomaten (10 Abfragen pro Sekunde im Devisengeschäft) gefährdet die regulierende Funktion der Börse schon bei verhältnismässig schwachen Kursschwankungen, die nicht geglättet, sondern elektronisch in Kollapsnähe aufgeschaukelt werden.<sup>6</sup>

**3 Verschiedenartigkeit der "Qualität" mathematisch-naturwissenschaftlichen Wissens.** Mathematische Modelle erhalten ihre politische Brisanz weder aus der Sicherheit noch aus der Unzuverlässigkeit der Berechnung, sondern daraus, daß in jedem neuen Einzelfall die Glaubwürdigkeit konkret beurteilt werden muß, statt sich nur auf nachweisliche Erfahrungen mit der Korrektheit oder Schwindelhaftigkeit mathematischer Modelle und Berechnungen in anderen Zusammenhängen zu berufen. Das Urteil wird dadurch erschwert, daß viele mathematische Formeln äußerlich ähnlich aussehen, auch wenn ihr wissenschaftstheoretischer Status, ihre Aussagekraft, die Art ihrer Nachprüfung und die Grenzen ihrer Anwendung recht unterschiedlich sein können:

Der binomische Lehrsatz  $(a + b)(a - b) = a^2 - b^2$  drückt eine Eigenschaft unseres traditionellen Zahlensystems aus, die allerdings für die Gleitkomma-Arithmetik im Computer nicht mehr gilt. Der pythagoräische Lehrsatz  $a^2 + b^2 = c^2$  folgt aus dem Axiomensystem der euklidischen Geometrie, gilt aber nicht mehr in gekrümmten Räumen wie z.B. die Kugel- oder Erdoberfläche. Die Formel  $K = m * b$  ist schlicht eine Definition, die Erklärung des Begriffs der Kraft. Die Gravitationsformel  $K = G * m_1 * m_2 / r^2$  drückt dagegen ein universelles Naturgesetz aus; schon der Verdacht auf eine kleinste Abweichung von der Formel ist *aufregend*.<sup>7</sup> Einsteins  $E = m * c^2$  wird heute als Definition der Energie benutzt, obschon ursprünglich ein Naturgesetz. Das Ohmsche Gesetz  $U = R * I$  ist dagegen nur die Linearisierung viel komplizierterer Beziehungen, obwohl es sehr zuverlässig in den Temperatur-, Spannungs- und Stromstärkebereichen des Alltags ist. Die Risikoformel  $R = P * F$ , wo  $P$  die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses mit der Folge  $F$  ist, besagt eigentlich gar nichts oder höchstens, daß das Risiko mit der Wahrscheinlichkeit und dem Ausmaß der Folgen wächst.

Folgen wir der in der Angewandten Mathematik üblichen Unterscheidung von Modellierung, rechnerischem Ansatz und Algorithmus<sup>8</sup>, so können wir für jede Ebene Unterscheidungsmerkmale und Qualitätskriterien angeben. Da gibt es ad-hoc-Modelle, die wie im Fischteichbeispiel solange glaubwürdig sind, wie sie empirisch nachprüfbar Sachverhalte darstellen. Dann können sie sogar hervorragend und unersetzbar sein wie ein gültiger Fahrplan oder ein anderes gutes Tabellenwerk. Ihre Anwendung außerhalb des empirisch zuvor nachgeprüften Gültigkeitsbereichs

<sup>6</sup> City hopes for steady state after Big Bang, New Scientist, 23. 10. 1986, 32.

<sup>7</sup> J. Maddox, Newtonian gravitation corrected, Nature 319 (1986), 173; Polar ice test of the scale dependance of  $G$ , Nature 326 (19. 3. 1987), 250f.

<sup>8</sup> R. S. Anderssen, F. R. de Hoog, The nature of numerical processes, Math. Scientist 1983, 115-141.

kann wie ein veralteter Fahrplan oder das Kursbuch des Nachbarlandes Anhaltspunkte geben, wird aber in der Regel wertlos und bei Übertragung der zuvor erworbenen Autorität auf die neue Situation irreführend und gefährlich sein. Theoretisch begründete Modelle wie das der Newtonschen Himmelsmechanik sind nicht notwendig genauer als die ad-hoc-Modelle; die Kodierung von Erfahrung in der Form von Theorie erlaubt aber einen flexibleren Gebrauch des Modells und die Abschätzung seiner Genauigkeit und möglicher Abweichungen auf theoretischem Wege, mit den Mitteln des Modells selbst.

Beim rechnerischen Ansatz unterscheiden wir zwischen einerseits der infinitesimalen Approximation, die ein großes, aber doch endliches System von Atomen, Molekülen, Tröpfchen, Bauelementen endlicher Größe als unendliches System unendlich kleiner "Punkte" auffaßt mit allen rechnerischen Vorteilen und Grenzen der klassischen Analyse, die sich daraus ergeben, und andererseits den finiten Methoden der Approximation von Systemen mit z.B.  $10^{18}$  wechselwirkenden Einheiten durch ein System mit vielleicht nur  $10^3$  wechselwirkenden größeren Einheiten oder Klumpen. Hierzu gehören auch Fragen der Abhängigkeit eines Urteils, einer Prognose, eines Qualitätsvergleichs von der Klasseneinteilung, die u.a. für statistische Tests wesentlich ist.

Eine Sonderstellung nimmt die Diskretisierung infinitesimaler Modelle ein, die aus historischen Gründen noch immer im Mittelpunkt des Interesses der Angewandten Mathematik steht. Es ist hier wirklich eine Wissenschaft für sich zu ermitteln, wann die Ergebnisse zu gebrauchen sind - und wann die Ergebnisse nur Eigenschaften der gewählten Verfahren widerspiegeln, ohne viel mit dem realen Ausgangspunkt zu tun zu haben.<sup>9</sup> Wir müssen auch untersuchen, ob ihrem Wesen nach nicht-lineare Beziehungen durch lineare approximiert werden und welchen Einfluß das auf die Ergebnisse haben wird: Beim Pendel ist z.B. der Unterschied zwischen der harmonischen und der gedämpften Schwingung nicht wesentlich, wenn man etwa die Geschwindigkeiten eines einzelnen Pendelschwungs oder die Kräfte in den Gleichgewichtslagen untersuchen will. Anders ist es bei der Synchronisierung zweier Pendel, wo die Linearisierung qualitativ irreführend ist.<sup>10</sup> In der Strömungslehre kann man die wesentlichen Wirbel weglinearisieren.<sup>11</sup>

Bei der Realisierung im Rechner kommt es zu Hardwarefehlern und Program-

---

<sup>9</sup> Vgl. J. Rappaz, Approximation of the spectrum of a non-compact operator given by the magnetohydrodynamic stability of a plasma, Numer. Math. 28 (1977), 15-24; B. J. Jamart, J. Ozer, Numerical boundary layers and spurious residual flows, Journal of Geophysical Research 91 (1986), 10621-10631.

<sup>10</sup> P. Bak, The devil's staircase, Physics Today, December 1986, 39-45.

<sup>11</sup> Das weiß man seit langem und ist so Allgemeingut dieser wissenschaftlich-technischen Branche geworden: Sorgfältige Untersuchungen darüber, wie weit die Wirbelbildung vernachlässigt werden kann, gehören zum Geschäft und lassen sich auf einem Stück Papier, im Windkanal oder mit Hilfe von anderen Experimenten durchführen. Ein neues Problem ist aber die Unsicherheit, wenn eine auf eine Linearisierung aufbauende Computersimulation einer Strömung aufgrund "numerischer Reibungsverluste" (durch Diskretisierung) zu Wirbeln führt, die dem Modell auch für nicht-laminare Strömungen den Anschein von Zuverlässigkeit geben. Hier liegt das Problem nicht im Abweichen des Modells von der Realität, sondern in einer Übereinstimmung, deren Grenzen sich einstweilen weder theoretisch noch experimentell abschätzen lassen.



mierfehlern; das können Tippfehler sein oder logische Fehler, defekte Compiler oder Programme, die die Abweichungen der Computerarithmetik von der gewöhnlichen Arithmetik nicht angemessen berücksichtigen, sondern bis ins Groteske steigern.<sup>12</sup>

**4 Machbarkeit ohne Beherrschbarkeit.** Die Geschichte der Technik und der mathematischen Physik gibt nur wenige Belege für das idyllische Bild vom Fortschreiten der Erkenntnis und des Handelns der Menschheit in inniger Wechselwirkung. Typischer ist die Kluft zwischen Theorie und Praxis. Sie hat zwei Seiten:

Häufig kommt es zu einem Vorlauf der Theorie, der grundwissenschaftlichen Ergebnisse vor ihrer Überführung in die Praxis. Wir kennen das zähe Weiterleben des überholten ptolemäischen Weltbildes in den astronomischen Tabellen der Schifffahrt oder die vielen Tausend Mannjahre, Schaffung riesiger Forschungs- und Entwicklungszentren, spezieller neuartiger Fabriken, ja ganzer Industriezweige, die zwischen dem grundlegenden Hahn-Straßmann-Experiment zur Kernspaltungskettenreaktion und dem Abschluß des Manhattanprojekts, der Atombombenproduktion, lagen. Hier handelte es sich um die Schwierigkeit, theoretische Erkenntnisse in die Praxis umzusetzen. Wissenschaftstheoretisch ein normaler Vorgang, durch den unmittelbar keine falschen theoretischen Vorstellungen, keine Illusionen erzeugt werden.

Die Kehrseite der Medaille ist die relative Selbständigkeit der Praxis, die sich oft im theoretisch nicht geklärten Raum bewegen muß. Sie ist geneigt, ihre situationsgebundenen Annahmen und Vorstellungen als Theorie auszugeben und damit Illusionen zu erzeugen. So wird Tag für Tag in der Strömungsmechanik mit numerischen Annäherungen an die Lösung von Navier-Stokes-Gleichungen gerechnet und zwar auch dort, wo die Existenz der eigentlichen Lösungen bisher nicht nachweisbar ist.<sup>13</sup> Technische Machbarkeit und mathematische Berechenbarkeit des Einzelfalls werden mit Kontrolle und Beherrschbarkeit verwechselt. Diese liegt aber nicht vor, solange die wissenschaftliche Grundlage, das Verstehen des "Umfeldes", des Verhaltens unter veränderten Bedingungen, die empirische Verbreiterung oder die theoretische Einbettung des ad-hoc-Einzelwissens fehlt. Es ist nicht immer fehlendes Wissen allein, sondern oft gerade der stürmische Fortschritt bei der Anhäufung von ad-hoc-Einzelwissen, der unsere Sicherheit, unser Leben, unsere Gesundheit gefährdet. Das ist das erkenntnistheoretische und politische Problem vieler neuer Technologien, der Reaktortechnik, der Gentechnik und der Informatik.

Die politische Bedeutung erfordert eine erkenntnistheoretische Diskussion, erschwert sie aber auch durch Voreingenommenheit und Glaubensbekenntnisse. Wir möchten deshalb das Problem des Vorlaufes von "Machbarkeit" vor "Beherrschbarkeit", von "Einzelwissen" vor "Theorie" zunächst an einem politisch weniger brisan-

---

<sup>12</sup> W. Coy, Die Außenwelt der Innenwelt - Über einige Schwierigkeiten mit der maschinellen Intelligenz, Umbruch 5,1 (März/April 1986), 32-40.

<sup>13</sup> Vgl. O. A. Ladyzhenskaya, Mathematical analysis of Navier-Stokes equations for incompressible liquids, Ann. Review of Fluid Mechanics 7(1975), 249-272; E. Turkel, Progress in computational physics, Computers and Fluids 11 (1983), 121-144; V. A. Solonnikov, A. V. Kazhikhov, Existence theorems for the equations of motion of a compressible viscous fluid, Ann. Review of Fluid Mechanics 13(1981), 79-95.

ten Beispiel erläutern, der Herausbildung unseres Wissens über Diffusionsprozesse.

**4A Diffusionsgleichung: Vom ad-hoc-Einzelwissen zur theoretischen Einbettung.** Diffusion ist der Massetransport in Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern durch die mikroskopische Relativbewegung der Teilchen. Die Moleküle eines Parfüms diffundieren durch die Zimmerluft auch bei deren Stillstand. Schwefeldioxyd breitet sich in der Luft aus und dringt in Bibliotheksbestände ein, wo es im Papier Schwefelsäuerlinge bildet und das Papier zersetzt. Die Vermischung von Gasen, unser erstes Beispiel, ist gut untersucht. Es gilt das Ficksche Gesetz, daß die Masse der in einer Sekunde durch einen Querschnitt von einem Quadratmeter hindurchdiffundierenden Parfümmoleküle proportional zum Konzentrationsgefälle ist. Die Parfümmoleküle breiten sich also im Durchschnitt dahin aus, wo weniger Parfümmoleküle sich befinden und insgesamt um so schneller, je größer der Konzentrationsunterschied ist.

Bei seiner Formulierung im Jahr 1855 hatte das Ficksche Gesetz zwei Grundlagen, die Analogie zur Wärmeausbreitung, die physikalisch etwas ganz anderes, nämlich Energietransport und kein Massetransport ist, und die gute experimentelle Nachprüfung. Das genügte, um lange Tabellen von Diffusionskoeffizienten anzulegen - für bestimmte Gemische und Temperaturen, und daraus mit großer Präzision den zeitlichen und räumlichen Verlauf von Diffusionen zu berechnen und vorherzusagen. Alle Berechnungen galten aber immer nur für die genau spezifizierte Situation. Übertragung der Ergebnisse auf verwandte, aber experimentell noch unerforschte Situationen war streng genommen nicht möglich, da noch das theoretische Verständnis z.B. für die Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von Temperatur und Molekulargewicht und die Gewissheit der Proportionalität, der Linearität der grundlegenden Beziehung zwischen Massetransport und Konzentrationsgefälle fehlte.

Das theoretische Verständnis wurde 1905 von Einstein mit seiner Erklärung der Diffusion aus der Statistik der thermischen Irrwege der Moleküle nachgeliefert. Das erlaubt noch immer keine zuverlässige Berechnung der Diffusion von  $SO_2$  durch die Luftporen von Papier, weil die begleitenden chemischen Reaktionen die charakteristische Ausbreitungszeit (ein Maß für den "Zeitzünder" zwischen Vergiftung der Bücher und ihrem Verfall) vom berechneten Sekundenbereich in historische Größen von Jahrzehnten oder Jahrhunderten bringt. Das gewonnene theoretische Verständnis sichert auch nicht gegen die Erzeugung von "verrückten", völlig verkehrten Lösungen bei der Simulation auf dem Rechner durch ein verkehrtes Verhältnis von Zeit- und Raumschritt bei der Diskretisierung. Aber es gibt den theoretischen Rahmen, in dem Zuverlässigkeit, Übertragbarkeit und Grenzen des Modells formuliert werden können.<sup>14</sup> Alles in allem: eine Erfolgsgeschichte.

**4B Theorielose Praxis.** Arbeit mit mathematischen Modellen und Simulation im Rechner vermittelt die folgenden Erfahrungen:

1. **ERFAHRUNG.** *Die Diffusion ist kein Einzelfall. Der wissenschaftlich-technische Fortschritt hat immer mehr Situationen hervorgebracht, wo ohne ausreichende the-*

<sup>14</sup> J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, Clarendon Press, Oxford 1975.

*oretische Grundlagen nur mit Hilfe von isolierten Einzelerkenntnissen hantiert wird im Vertrauen darauf, daß die Praxis das nicht denunziert und die Theorie es nachträglich legitimiert. In begrenzten Situationen mag das angehen, in nicht-eingrenz- baren wachsen die Risiken ins Unerträgliche.*

BEISPIEL: Rechnergestützte, quantenchemische Methoden haben sich in der tech- nischen Chemie vielfach bewährt, um die Übersicht über die endlichen Kombi- nationsmöglichkeiten vorgegebener Atome zu Molekülen zu behalten. Sie werden auch in der Feststoffphysik bei der Suche nach neuen Stoffen mit bestimmten Ma- terialeigenschaften angewandt, obwohl nun auch komplexere Beziehungen wie die Kristallstruktur und die Beweglichkeit der Elektronen modelliert werden müssen und einfache Beschreibungen der wesentlichen, bestimmenden Faktoren immer noch fehlen.<sup>15</sup> Kein Wunder, daß sich bei den jüngsten bahnbrechenden Entdeckun- gen des militärtechnisch relevanten Galliumarsenid-Halbleiters<sup>16</sup> und der neuen supraleitenden Stoffe<sup>17</sup> nicht die Computermodelle, sondern eine an die Alchimie erinnernde Herumprobiererei bewährt haben. So ist also die Situation in der mit wohldefinierten Fragen und nahezu unbegrenzten Mitteln ausgestatteten Material- wissenschaft. Wie kann man dann glauben, daß sich die nicht weniger komplexen medizinischen "Materialeigenschaften", die biologischen Risiken neuer Stoffe, z.B. bei der Genmanipulation, im voraus berechnen und damit ausschließen lassen?

2. ERFAHRUNG. *Guter Wille nützt nichts, wenn er auf technologische Lösungen im Grenzbereich unseres Wissens und jenseits davon abzielt und die mathematisch- naturwissenschaftliche Komplexität und die Risiken weiter erhöht.*

BEISPIEL: Müllverbrennungsanlagen wurden als Alternative zu grundwasserbedro- henden Deponien konzipiert. Später lernte man, daß sich bei der Müllverbrennung *HCl* und Dioxin bilden. "Naturschutz" und die Bewahrung entlegener Naßbiotope gewannen Vorrang vor dem Schutz der Menschen in Ballungsgebieten. Schlimmer, die Machbarkeit von technologischen Scheinalternativen verhinderte das Beschrei- ten von gesellschaftlichen realen Alternativen: Statt zu Materialwiederverwendung, Müllsortierung und einem radikalen Eingriff in die Produktion, Verpackung und Zirkulation industrieller Lebensmittel - ein naturwissenschaftlich überschaubarer, aber gesellschaftlich gewiß komplexer Ansatz - kam es durch die Entscheidung für die gesellschaftlich einfachere, aber naturwissenschaftlich einstweilen noch unüber- schaubare Lösung der Müllverbrennungsanlagen zu einer zusätzlichen Krebsgefähr- dung der Stadtbevölkerung in einer dem Tabakrauchen möglicherweise vergleich- baren Größenordnung.<sup>18</sup> Nun wird über kompliziertere Rauchreinigungsanlagen nachgedacht!

<sup>15</sup> H. Ehrenreich, *Electronic theory for material science*, Science 235 (1987), 1029-1035.

<sup>16</sup> Sh. Karp, S. Roosild, Darpa, SDI, and GaAs, *Computer*, October 1986, 17-19.

<sup>17</sup> M. Strongin, D. O. Welch, J. W. Davenport, *Superconductivity at high temperatures in doped oxides*, Nature 325 (1987), 664-665.

<sup>18</sup> B. Commoner, *Incinerators: The City's half-baked and hazardous solution to the solid-waste problem*, New York Affairs 9 (1985), no. 2, 19-33.

3. **ERFAHRUNG.** *Komplexität und Unsicherheit wachsen rasant bei der Vernetzung von Prozessen, wenn einzelne allein schon nicht völlig beherrschbare Knotenpunkte verknüpft werden.*

**BEISPIEL:** Zur Vernetzung gehört auch der synergetische Effekt, die qualitativ neue und oft unvorhersehbare kombinierte Wirkung zweier an sich gutartiger, aber unzureichend erforschter Stoffe. So gibt es im Alltag des Bauern Düngemittel und Schädlingsbekämpfungsmittel, die in der Tankmischung mit anderen Schädlingsbekämpfungsmitteln deren Eindringfähigkeit durch das menschliche Fettgewebe um ein Vielfaches erhöhen.<sup>19</sup>

4. **ERFAHRUNG.** *Nicht weniger riskant ist die unkontrollierte Vernetzung einer großen Anzahl individuell sogar ganz gut beherrschbarer Knotenpunkte; sie ist besonders riskant, wenn die Sicherheit im Umgang mit dem Teilprozeß auf das Ganze projiziert wird, da die Vernetzung eine Fortpflanzung von Abweichungen und Unglücksfällen weiter über den unmittelbaren Anlaß hinaus erlaubt und so die Größenordnung möglicher Schäden drastisch verändert.*

**BEISPIEL:** Blei gehört zu den ältesten und am besten erforschten Giften. Als aber 1923 die Beimischung von organischen und medizinisch besonders riskanten Bleiverbindungen zum Benzin als Antiklopfmittel begann, fehlte es in den USA an gesellschaftlichen Kräften, um die offensichtlichen Risiken zu thematisieren. Nur im betrieblichen Bereich der Produktion und Distribution konnten von den Gewerkschaften Sicherheitsmaßnahmen, Grenzwerte und begleitende medizinische Untersuchungen durchgesetzt werden. In der Sowjetunion wurde dagegen für alle Städte der Gebrauch von verbleitem Benzin verboten.<sup>20</sup> Vom Standpunkt der an den Raffineriearbeitern durchgeführten Untersuchungen war dieses Verbot unnötig, da die meisten Arbeiter viel höhere Konzentrationen ohne Gesundheitsschädigung überstanden hatten; vom Standpunkt der Schonung der Ressourcen war das Verbot schädlich, weil die Lebensdauer der Benzinmotoren erheblich verkürzt wurde.

Vom Standpunkt der Komplexitätstheorie war es jedoch richtig, weil es sich um ein hochvernetztes Problem mit ungeklärtem Zusammenwirken handelt: Produktion und Transport der Gifte; Verbrennung im Motor, Rückstand und Emission; Ausbreitung in der Luft, Niederschlag, Deponierung in der Erde; räumliche Verteilung von Transportadern, Wohnverhältnisse, Plazierung von Kindergärten, Schulen und Spielplätzen; Aufnahme in den Körper durch Lunge und Magen und Transport in der Blutbahn; physiologische Mechanismen, Enzymwirkung etc. Die meisten dieser Fragen hätte man damals schon genauer untersuchen können. Es gab aber keine Gesamtanalyse und keine scharfe Trennung in die Einzelprobleme; die medizinischen Teilprobleme waren in sich schon hoch vernetzt und unklar. So lag damals zwar schon viel statistisches Material vor, aber noch keine ausreichende

---

<sup>19</sup> Miljømæssige og toksikologiske effekter ved blandinger af pesticider (tankblandinger), Miljøstyrelsen, København 1983.

<sup>20</sup> H. A. Waldron, Lead, in: H. A. Waldron (Hrsg.), Metals in Environment, Academic Press, London 1980.

biochemische Erklärung für den Mechanismus der Bleivergiftung und seiner hemmenden und fördernden Bedingungen. Tatsächlich fand man dann Anfang der 70er Jahre erdrückende statistische Beweise für starke neurologische Schäden bei Kleinkindern mit erhöhter Bleikonzentration in Blut und Gehirn, wobei zunächst unklar war, ob Autoabgase oder Knabbern an Gegenständen mit Bleifarben für die Vergiftungen verantwortlich waren. Es zeigte sich dann, daß Blei für Kinder deshalb besonders giftig ist, weil ihr Gehirn noch nicht durch die "Blutbarriere" geschützt ist.<sup>21</sup>

5. *ERFAHRUNG. Die Auflösung komplexer Probleme in ein Netz von Prozessen mit möglichst schmaler Schnittstelle kann dagegen durchaus ein Gewinn sein, wenn die Einzelknoten voll durchschaubar sind.*

BEISPIEL: Computermodelle über die globalen Wirkungen eines begrenzten Nuklearkriegs führten zu der Untersuchung von möglichen Klimaänderungen auf Grund von Staub- und Rauchemission, eine Fragestellung, die zuvor im militärischen wie im antimilitaristischen Zusammenhang mit dem Hauptaugenmerk auf die großen Energieumsetzungen übersehen worden war. Das Computermodell war also heuristisch eingesetzt worden - zur Generierung von Fragestellungen und Hypothesen, während die Antwort, die Prognose des nuklearen Winters, dann aus den konkreten, von der Fragestellung angeregten, präzise definierten und untereinander unabhängigen astrophysikalischen, vulkanologischen, aerodynamischen etc Einzeluntersuchungen abgeleitet wurde.<sup>22</sup>

6. *ERFAHRUNG. Gepufferte Systeme haben die Tendenz, erst zu einem Zeitpunkt zu reagieren, wenn große und u.U. irreversible Schäden bereits entstanden sind. Die sichtbare Warnung kommt verspätet, oft zu einem Zeitpunkt wo die Entsorgung nicht mehr oder nur äußerst schwierig durchgeführt werden kann.*

BEISPIEL: Die Wirkung der Luftverschmutzung auf die Wälder blieb lange verborgen, da das System Wald eine gewisse Menge von Schadstoffen abpuffern kann; das System reagiert auf die Störung mit Verzögerung. Ähnliches gilt wahrscheinlich auch für den Treibhauseffekt durch die erhöhte CO<sub>2</sub> Konzentration der Atmosphäre

---

<sup>21</sup> Vgl. D. Baltrop, Children and environmental lead, in: P. Hepple(Hrsg.), Lead in the Environment, Applied Science Publishers Ltd, Barking, Essex, on behalf of The Institute of Petroleum, London 1973, 52-60. In glücklicher Übereinstimmung mit den Interessen der Auftraggeber kam Dr. Baltrop noch zu folgender Wertung: "The relative contributions of atmospheric and dietary lead to the soft tissue lead concentration of children has not yet been established..children have not been shown to be more susceptible to lead than adults.." Inzwischen kann die Flut von gegenteiligen Untersuchungen nicht mehr abgetan werden, siehe P. Grandjean, Widening perspectives of lead toxicity, Environmental Research 17 (1978), 303-321.

<sup>22</sup> Vgl. C. Covey et al., Global atmospheric effects of massive smoke injections from a nuclear war: results from general circulation model simulations, Nature 308 (1984), 21-25; R. P. Turco, The climatic effects of nuclear war, Scientific American 251 (1984), 23-33; M. A. Harwell, Nuclear Winter, Springer- Verlag, New York 1984; M. Chown, Smoking out the facts of nuclear winter, New Scientist, 11. 12. 1986, 24-25; dort auch C. Sagan: "The very idea of nuclear winter was missed for 38 years. What else have we missed? What other consequences?"

mit einer Abpufferung in der Vermischung der Wassermassen der Ozeane.<sup>23</sup> Wenn schon von den drei wärmsten Jahren seit 1861 keines länger als 7 Jahre zurückliegt<sup>24</sup>, so haben wir es hier möglicherweise "nur" mit den Spätfolgen früheren Raubbaus zu tun, die es unter widrigen Bedingungen unsicher erscheinen lassen, ob wir oder unsere Nachfahren noch die Folgen der von uns erzeugten Verschmutzung erleben werden.

**FOLGERUNG.** *Nach Kenntnis der Unbeherrschbarkeit einzelner Komponenten und Prozesse, nach Kenntnis der hier demonstrierten Schwierigkeiten bei der Prognose von Materialeigenschaften und medizinischen Wirkungen bestimmter Grundstoffe und Verbindungen und Vernetzungen, gibt es keine Grundlage für irgendeine Beruhigung angesichts der leichtsinnig hergestellten und täglich weiter synthetisierten Chemikalienvielfalt in Millionenzahl.*<sup>25</sup>

Wir begannen die Erörterung von Risiken der Technik in Abschnitt 3 mit einer Beurteilung der unterschiedlichen Qualität mathematischer Berechnungen, wobei wir die Ebenen der Modellierung, der Approximation und Analyse und der Realisierung im Rechner unterschieden. Das nun vorgelegte Bündel von Erfahrungen mit theorieloser Praxis, mit der Machbarkeit nicht-beherrschbarer Technik *heftet sich allein an die Unsicherheiten der Modellierung*, ohne die anderen Unsicherheits Ebenen zu bagatellisieren. Unsere Beispiele belegen verschiedene objektive Erkenntnisprobleme:

- Das Fehlen von theoretisch begründeten oder allseitig empirisch geprüften Modellen für Handlungsbereiche.
- Die Vernetzung von Prozessen und Wirkungen.
- Die Verschleierung von Wirkungen in gepufferten Systemen.
- Die gigantische Komplexität möglicher Wechselwirkungen.

**4C Menschliche Erkenntnisschranken.** Neben diesen objektiven, in der Sache begründeten Schwierigkeiten beim Versuch, alle wesentlichen Auswirkungen komplexer Prozesse zu überschauen, besteht eine Reihe wirksamer Erkenntnisschranken auch in den Köpfen, dem Wissenschaftsbetrieb und der Gesellschaft. Noch gibt es freilich keine Sozialpsychologie wissenschaftlich-technischer Berechnungen, die diese

<sup>23</sup> J. Hansen et al., Climate response time: dependence on climate sensitivity and ocean mixing, *Science* 229 (1985), 857-859.

<sup>24</sup> P. D. Jones et al., Global temperature variations between 1861 and 1984, *Nature* 322 (1986), 430-434.

<sup>25</sup> Es ist ein großes Verdienst der GRÜNEN, die öffentliche Aufmerksamkeit auf dieses Problem gelenkt - und treffende und einprägsame Formulierungen für die gesellschaftlichen Wirkungen von Fortschritten in der Naturerkenntnis und technischen Erneuerungen, für die Verschärfung des Widerspruchs zwischen Machen und Beherrschen gefunden zu haben: "Das Ausmaß der Gefahr ist unübersehbar... Etwa 9 Millionen Chemikalien wurden synthetisiert und weltweit kommen pro Tag 800 bis 1000 neue hinzu, deren Wirkungen weitgehend unbekannt sind. 60000 bis 70000 Chemikalien gelten heute als umweltrelevant, sie verändern etwas, wenn sie mit der Natur in Berührung kommen. Die Untersuchung einer einzigen Substanz, allein auf ihre unmittelbaren und isolierten Wirkungen hin, dauert etwa zwei Jahre..." , Th. Ebermann, R. Trampert, *Die Zukunft der Grünen: Ein realistisches Konzept für eine radikale Partei*, Konkret Literatur Verlag, Hamburg 1984, S. 28.

menschlichen Erkenntnisschranken systematisch untersucht. Wir können deshalb hier nur Anhaltspunkte.

**INDIVIDUUM:** Langsam ablaufende Veränderungen sind für den einzelnen Menschen oft schwer erkennbar. Die Veränderungen sind graduell. Die Erwartung des Mittelalters, daß alles so bleibt wie es war, ist längst untergegangen im Erlebnis großer drastischer Umwälzungen. Es fehlt aber nun die Sensibilität für die mögliche Bedeutung kleiner, unscheinbarer Veränderungen. Dazu kommt die Einübung in die "üblichen" Lösungsstrategien, z.B. die "lineare" Reaktion, die Erwartung doppelter Wirkung bei doppelter Leistung. Die Erfahrung, daß Dinge sich nach anderen Gesetzen entwickeln, ist selten; die spontane Reaktion, da ungebildet, falsch. Der Bremsweg eines PKWs wächst schneller als linear mit der Geschwindigkeit, doch die "Faustregel" für die zu übersehende Strecke heißt "halber Tacho".

Der Präsident der Weltföderation der Wissenschaftler, J.-M. Legay, hat hierzu einmal die folgende Gedankenkette vorgetragen: (i) Die Welt stellt sich komplex dar; die Wirklichkeit ist unerschöpflich. (ii) "Folglich können unsere Probleme nicht mit einer magischen Zauberformel gelöst werden. Auch nicht durch eine dogmatische Entscheidung." (iii) Der große 'Fehler' der Wissenschaft, ihr komplexer Aufbau, der Verstehen an zahlreiche Voraussetzungen knüpft, ist eine Notwendigkeit und eine Errungenschaft. (iv) Dagegen steht, daß die Mehrzahl der Menschen in einem großen Teil der Welt sich dieser Komplexität nicht bewußt, wissenschaftlich ungebildet ist - u.a. auf Grund der abstrakten Form des wenigen vermittelten Wissens. (v) Ihre Sucht nach einfachen Antworten, ihr Widerwillen gegen komplizierte Untersuchungen müssen überwunden werden.<sup>26</sup>

**WISSENSCHAFTSBETRIEB:** Das Fehlen zuverlässiger wissenschaftlicher Grundlagen in vielen Handlungsbereichen, das Ungleichgewicht zwischen Machbarkeit und Beherrschbarkeit, lenkt die Aufmerksamkeit darauf, wie die Hervorbringung wissenschaftlicher Erkenntnisse organisiert ist. Mal wird die Bedrohung der Menschheit durch Kernwaffen und Umweltverschmutzung auf Schwächen im Wissenschaftsbetrieb zurückgeführt, mal wird ihre Erlösung von seiner Reorganisation erwartet; mal wird das Fachidiotentum angeprangert, mal die smarte Geschäftigkeit und Anpassungsfähigkeit von Institutsdirektoren bloßgestellt; mal wird der Wissenschaftsbetrieb als Elfenbeinturm belächelt, mal als Machtzentrum dämonisiert.

Diese Zerrbilder passen allesamt recht schlecht auf den Alltag der Wissenschaft, weder auf das Leben an den wissenschaftlichen Hochschulen, noch an den Forschungsinstituten der Industriezweige<sup>27</sup>: Nicht der enge Spezialist ist heute tonangebend, sondern das Forscherteam oder die herausragende Einzelpersonlichkeit, die enge

---

<sup>26</sup> J.-M. Legay, *Qui a peur de la science*, Editions Sociales, Paris 1981; dt. *Wer hat Angst vor der Wissenschaft*, Urania-Verlag, Leipzig 1984, 29-31. Legay gibt dort das folgende Gleichnis: "Wenn ich ein altes Schloß betrete und einen Balken knarren höre, dann habe ich die Wahl zwischen zwei Lösungen: Entweder ich denke an ein Gespenst, dessen Existenz das Knarren vollständig und einfach erklären würde, oder ich bin zu einer (langen, vielleicht verdrießlichen und sicher komplexen) Analyse der Vorgänge bereit, die zu dem Ereignis geführt haben..."

<sup>27</sup> Vgl. J.-M. Legay, a.a.O., S. 11 oder das empirische Material und die Analyse auch und gerade zur jüngeren Mathematikgeschichte in B. Boß, J. Høyrup, *Von Mathematik und Krieg*, Schriftenreihe des BdWi, Marburg 1984.

vorgegebene Bahnen überwinden können. Umgekehrt dürften auch heute kaum die Think-Tanks der Rand Corporation das letzte Wort bei der Finanzierung von SDI haben.

Und doch gehört zum Wissenschaftsbetrieb auch die Konzentration auf eine Seite einer Beziehung, d.h. Arbeitsdisziplin und geistige Enge, sowie z.B. das Einwerben von finanziellen Mitteln und die Rechenschaftslegung, d.h. Reklame, Anpassung und Fremdsteuerung. Hier in der Außensteuerung oder Außenorientierung liegen die Hauptquellen der Erkenntnisschranken im Wissenschaftsbetrieb, der Verzerrungen aufgrund der Auswahl, Zuweisung oder Ablehnung von Thematik, Mitteln und Methoden. Im Vergleich dazu sind die Erkenntnisschranken aufgrund des Spezialisentums vernachlässigbar; ohnehin liegt das Problem dort ja nicht in der bewußten Ableitung von Einzelresultaten mit wohldefinierten Gültigkeits- und Anwendungsgrenzflächen (wenn dabei die Dinge nicht unnötig kompliziert werden, liegt darin gerade die Voraussetzung für ein gemeinschaftliches Herangehen, für die organisierte Kombination verschiedener Erfahrungen, für die Einbeziehung der Öffentlichkeit), sondern im spontanen nicht-kontrollierten Überschreiten der Kompetenzgrenzen, wieder in der voreiligen Überführung erworbener Sicherheit im eigenen Gebiet auf Nachbargebiete und Zusammenhänge. Das äußert sich so:

Die verallgemeinerten Kenntnisse über Nachbargebiete des eigenen Fachgebietes sind meistens veraltet. Verallgemeinerungen der eigenen Arbeit finden deshalb häufig auf einer historisch überholten Stufe statt.

Das ist der wissenschaftsinterne Grund, warum die Aussagen von Experten paradoxerweise meistens mehr wert sind, wenn sie nur Detaillösungen im Rahmen ihres Faches vorschlagen - und sei es auch ohne Berücksichtigung der Verflechtungen mit den Nachbargebieten, als wenn sie ihre enge Fachautorität in illegitimer Weise auf selbstgebastelte naive und hinterwäldlerische Vorstellungen vom Zusammenhang ihres eigenen Gebietes mit anderen Bereichen übertragen. Ein tüchtiger Kraftfahrzeugingenieur verdient viel Vertrauen bei der Suche nach einer Verbesserung bestehender Verbrennungsmotoren und, wenn es hoch kommt, auch bei der Suche nach Alternativen zum Ottomotor als Antriebsmaschine; erst seinen weitergehenden Überlegungen als "Transportexperte" muß mit größtem Mißtrauen begegnet werden, wenn er z.B. nicht den anarchischen, rohstoffverbrauchenden, umweltverschmutzenden Individualverkehr und die irrationale Art der Arbeits- und Wohnplatzallokation in Frage stellt.

**ÖFFENTLICHKEIT:** Der neue Charakter der Wissenschaft, die als Produktivkraft und als Destruktionsmittel die Lebensumstände der Menschheit beeinflusst, hat den Begriff der Öffentlichkeit auf eine neue Stufe gehoben: Entscheidungen über neue Waffensysteme sind nicht mehr den Kriegskabinetten, die Beschlußfassung über chemische Produktionsverfahren nicht mehr den Konzerndirektoren vorbehalten. Mit der gewachsenen Bedeutung von Wissenschaft mußte durch Einbeziehung der "Experten" auch die soziale Basis von Entscheidungen verbreitert werden; abweichende Expertenmeinungen erwiesen sich als ein Vehikel, um die Entscheidungen - oder zumindest die Erörterung von Entscheidungen - weiter zu objektivieren, in der



Tendenz zu demokratisieren, in eine breitere Öffentlichkeit zu tragen.<sup>28</sup>

Dieser Prozeß ist in Wirklichkeit allerdings noch recht zwiespältig: Statt eines organischen Zusammenspiels zwischen Bevölkerung, Experten und Mediatoren finden wir die Delegation von Entscheidungen an diese Experten und Mediatoren oder die Verschanzung anderer sachfremder Interessen hinter ausgewählten und in den Vordergrund geschobenen Experten und Mediatoren. Auf diese Weise tun sich neue Erkenntnisschranken auf: Werden z.B. mit dem Gefühl unzureichender eigener Qualifikation für die Beurteilung schädlicher oder positiver Wirkungen Entscheidungen an Experten delegiert, so ändern sich die Kriterien, da nunmehr nur fachspezifisch geprüft wird, welche Aussagen im Rahmen welcher Voraussetzungen richtig sind. Oftmals wird man diese Frage nicht abschließend entscheiden können; es bleiben also Zweifel. Die Gründe für eine bestimmte Entscheidung (oder für ihre Unterlassung) werden dann durch dritte, die Medi(ator)en, vermittelt. Auf diese Weise wird die anstehende Entscheidung zu eng, oft nur aus einem einzigen beschränkten Gesichtspunkt als "fachlich richtig - ja oder nein" beurteilt und dann etwa in dem Sinne "die Fachleute sind sich über mögliche negative Folgen nicht einig, also sollten wir doch die augenscheinlichen Vorteile nutzen" zwischenbeurteilt. So hat der glänzende Statistiker R. A. Fisher als Berater der britischen Tabakindustrie mehrere Jahre seines Lebens und sein ganzes wissenschaftliches Renommee dafür benutzt, um die Evidenz der gesundheitlichen Schädlichkeit des Rauchens mit wissenschaftlichen Zweifeln zu überziehen und Warner vor dem Rauchen mundtot zu machen: Eine tragische Verknüpfung und wechselseitige Verstärkung von Korruption, Arroganz, extremer zur Fachidiotie verkümmelter Kompetenz und Sensationspresse.<sup>29</sup>

Mit der Delegation an "Experten" und "Mediatoren" geht die politische Entscheidung eines jeden verloren, welches Handeln man sich trotz begründeter Zweifel noch leisten will. Als Ersatzreaktion finden wir dafür entweder die Losung "Das Machbare Machen" oder "Nichts Verändern". Nur allseitig gebildete Bürger, deren Selbstachtung und Verantwortungsgefühl nicht durch zu langes Verweilen in undurch-

---

<sup>28</sup> Ähnlich J.-M. Legay, a.a.O., S. 13: "Manche Diskussionen irritieren, weil sie schlecht verstanden werden, weil sie von den Spezialisten, die wenig geneigt sind, ihr Wissen zu teilen, schlecht vorbereitet sind, und weil sie von den herrschenden politischen Kräften, die daraus einen Vorteil ziehen, in die falsche Richtung gelenkt werden. Dennoch bleibt festzustellen, daß das Interesse, das durch die Verbreitung der Kernwaffen, durch die Energieversorgung und die nuklearen Energiequellen sowie den ökologischen Standpunkt zu unserer Umwelt geweckt wird, ein Anzeichen dafür darstellt, daß die aufgeworfenen Probleme und ihre Lösungswege schon nicht mehr nur die Angelegenheit einer kleinen Elite sind, die niemandem Rechenschaft ablegen muß." Vgl. auch die jüngsten Fallstudien von S. Salygin, Wie die Umleitung der sibirischen Flüsse gestoppt wurde - Ein Lehrstück über "glasnost", Bürgerinitiative und die Schwierigkeiten der "perestrojka", Bl. f. deutsch. u. internat. Politik 32 (5-1987), 666-685, Übersetzung aus Nowy Mir; und von A. Wolkow, Nach dem Unglück - Die sowjetische Öffentlichkeit und die Katastrophe von Tschernobyl, Probleme des Friedens und des Sozialismus 30 (4-1987), 540-545.

<sup>29</sup> Vgl. R. A. Fisher, Smoking: The Cancer Controversy - Some Attempts to Assess the Evidence, Oliver and Boyd, Edinburgh 1959; nachgedruckt in J. H. Bennett (Hrsg.), Collected Papers of R. A. Fisher, Vol. V, 376-431; J. Fisher Box, R. A. Fisher - The Life of a Scientist, John Wiley, New York 1978, 472-476.

schaubarer und für sie unbeherrschbarer Umgebung zerstört worden ist, können die Informationsflut von Experten und Mediatoren nutzen und die Initiative behalten oder wiedergewinnen.<sup>30</sup>

**DAS KAPITAL:** Die einfachste Erkenntnissschranke wirkt in den Köpfen derer, die vom Profit leben. Sie werden nicht leicht akzeptieren, daß mit der bisherigen Rücksichtslosigkeit nicht mehr produziert werden kann, und sie sind selten zur Revision ihrer Profiterwartungen bereit. Die Eigentumsfrage darf aber nicht zum Ruhebett, die Systemauseinandersetzung nicht zur Universalerklärung werden:

*"Das 20. Jahrhundert mit seiner beispiellosen wissenschaftlich-technischen Explosion implantierte ein künstliches Organ - die Weltwirtschaft - in die Biosphäre, und nun vergiftet dieses Organ sie langsam aber sicher... Viele haben begriffen, daß die Umweltkrise viele Gründe hat, vor allem aber auf die Verbrauchermoralität auch im Hinblick auf die Natur zurückzuführen ist."*<sup>31</sup>

Zurecht war dort nicht die Rede von irgendeinem bestimmten Teil der Weltwirtschaft, da die ohnehin unterschiedlich gewerteten spezifischen Systembeiträge in diesem Zusammenhang nebensächlich sind. Die Relevanz der Systemfrage kann sich aber in der Fähigkeit zur Umsetzung der verspäteten Einsicht in wirkliche Umsteuerung der Produktion erweisen. (Das ist aber noch eine offene Frage. Immerhin ist aber die Ausdehnung des Produktionsprozesses als Vergrößerung des Kapitals eine Existenzbedingung nur des Kapitalismus, während sie im Sozialismus Gegenstand von politischen Entscheidungen ist.)

**4D Problemlösung ohne "Erfassung der Situation".** Man hört oft, daß zwischen Theorie und Methode, zwischen Modell und Werkzeug unterschieden wird. Danach liefern Methode und Werkzeug Problemlösungen und Theorie und Modell Beschreibungen und Erklärungen. Aber sind diese Schubladen sauber getrennt? Z.B. kann man mit Hilfe des "Pledge-Algorithmus" der Suchtheorie aus jedem ebenen Labyrinth mit Ausgang herausfinden. Doch das Verfahren löst nur das Problem, zum Ausgang zu finden, und liefert keinen Plan des Labyrinths; es ist also wertlos zum Beschreiben und Erklären und sammelt für einen zweiten Versuch, aus demselben Labyrinth zu entkommen, keine Erfahrung an. Aber indem das Verfahren immer unter den angegebenen Bedingungen zur Lösung führt, enthält es etwas Allgemeines. Es erklärt eine Seite des Begriffs "Labyrinth" und wird so zur Theorie.<sup>32</sup>

Für weite Teile der mathematischen Physik fällt es schwer, zwischen Methode und Theorie scharf zu trennen. Wir kennen nicht vollständig die Natur des Lichtes, aber wir kennen die Kriterien, wann Licht am besten als Strahl, als Welle oder als

---

<sup>30</sup> Das alarmierende Vordringen neureligiöser und mystischer Weltvorstellungen - auch bei der Intelligenz: so wurde kürzlich ein Sonderheft der Zeitschrift *Physics Education* (1-1987) und nun am 25. 3. 1987 die ganze Wissenschaftsbeilage der Zürcher Zeitung unter der Überschrift "Technologie und Gesellschaft" ausschließlich von Theologen bestritten - muß in Wiederaufnahme der marxistischen Religionstheorie aus dem Rückfall in unbeherrschte und undurchschaubare - jetzt aber nicht mehr natürliche und auch nur zum Teil gesellschaftliche, sondern künstliche, von der Technik geschaffene - Verhältnisse erklärt werden.

<sup>31</sup> G. Pissarewski, Die "schwarzen" Flecken löschen! *Neue Zeit*, Moskauer Hefte für Politik 12.87, Themennummer über die Umweltkatastrophe, 18f.

<sup>32</sup> M. Otte, Wege durch das Labyrinth - Notiz über eine cartesische Methode, *Debatte* 4/86, 39-48.

Teilchen zu modellieren ist. Wir haben es gelernt, hier mit unserer Unwissenheit korrekt umzugehen.

Schließlich gibt es Technologien wie die Turbine, die nur deshalb eingeführt werden konnten, weil sich die Techniker und Ingenieure rigoros über die vorhandene Unwissenheit und die akademische und patentamtliche Forderung des theoretischen Verständnisses ihrer Erfindung hinwegsetzten.

Problemlösung ohne Erfassung der Situation ist also ein ganz normaler Vorgang, sei es daß die Methode eine verkappte Theorie ist oder eine bestimmte Facette der Wirklichkeit erfaßt oder ohne all zu großes Risiko nachträglich in der Praxis erforscht werden kann.

**4E Betonierung von Lösungsverfahren.** Die berechtigte und erfolgreiche Anwendung von Methoden zur Problemlösung ohne entsprechende Erfassung der Situation kann aber auch sehr negative Folgen haben.

Einmal: Wo keine Theorie da ist, um Wege zu vergleichen, wird die Grenze zwischen dem angemessenen und dem unangemessenen Verfolgen von Wegen verwischt. Der Leichtsinns wird ermuntert; fehlerhafte Methoden werden nur wegen eines illusionären Anspruchs auf allgemeine Gültigkeit schon für Theorie gehalten; grobe Verzerrungen werden als notwendige Vereinseitigungen ausgegeben; und die Gesundheit und das Leben von Millionen Menschen werden für die praktische Erprobung theoretisch noch nicht ausreichend verstandener Verfahren aufs Spiel gesetzt.

Zum anderen: Neben der Ermunterung zum Leichtsinns steht die Ermunterung zum Starrsinns, die Betonierung von in gewissen Situationen bewährten unverstandenen Lösungsverfahren. Gerade weil der Zusammenhang unverstanden bleibt, kann die Tragweite einer Methode schwer abgeschätzt werden.

Deshalb haben sich die Programmiersprachen Fortran und die abgemagerte Version Basic auf Grund ihrer bloßen Existenz und wegen des Fehlens einer Theorie des Programmierens als Voraussetzung einer Qualitätsbeurteilung so lange halten können. Basic fand übrigens zu einem Zeitpunkt massenhafte Verbreitung, als die Fehlanlage der Sprache bereits wissenschaftlich erkannt war und viele wissenschaftlich begründete Alternativen bereit standen.

Die gleiche Geschichte können wir von der mathematischen Statistik erzählen, wo Momente noch immer meistens durch den Mittelwert geschätzt werden, obwohl die zugrunde liegende Methode der kleinsten Fehlerquadrate nur bei normalverteilten Werten "richtig" ist und sonst riskant und "nicht-robust".<sup>33</sup>

Oder wir sehen, wie die Methode der finiten Elemente, die aus der Baustatik kommt und da theoretisch begründet ist, auch zunehmend in der Strömungsmechanik angewendet wird, obwohl ganz andere Kräfte zwischen den kontinuierlich verteilten Flüssigkeits- oder Gasteilchen wirken als zwischen den diskreten Trägerelementen einer architektonischen Struktur.<sup>34</sup>

<sup>33</sup>P. J. Huber, Robust statistics: a review, *The Annals of Mathematical Statistics* 43 (1972), 1041-1067.

<sup>34</sup>Vgl. G. Pinder, W. Gray, *Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology*, Academic Press, New York 1977; K. P. Holz, U. Meissner, W. Zilke, C. A. Brebbia, G. Pinder, W.

Wieso konnte es dazu kommen? Bei Massenprozessen gibt es immer viele Handelnde. Viele hatten keinen Zugang zur Theorie, konnten es nicht besser wissen; einige haben sich wohl nicht sonderlich für die Folgen ihres Handelns interessiert. So belegt die Geschichte nicht nur, wie folgenreich eine Praxis ist, die die Theorie verachtet, sondern auch wie leicht Handhabbarkeit mit Beherrschbarkeit verwechselt wird.

4F Technikromantik, KI und Realität. Viel können wir zum Thema "Erkennbarkeit" und "Beherrschbarkeit" aus der Fachliteratur der "Künstlichen Intelligenz" der letzten zwanzig Jahre lernen. Von dem frischen Bastlergeist der ausgehenden 60er Jahre ist nicht viel übrig geblieben. Stattdessen finden wir einen gewiß nützlichen Austausch von technischen Kniffen und unvermittelt daneben utopische Visionen.

Keine der Prognosen von damals über die Wunder der 80er Jahre ist in Erfüllung gegangen<sup>85</sup>: Noch gibt es keine mobilen Roboter, die sich relativ frei in einer industriellen Umgebung bewegen können, oder fahrerlose Autos auf unseren Straßen; noch ist die Bildverarbeitung z. B. beim Schriftlesen und die maschinelle Verarbeitung menschlicher Sprache nicht universell, sondern nur durch Training auf den jeweiligen Schrift- oder Sprachtyp gelöst; eine Formalisierung des Alltagswissens ist nicht gelungen; die praktischen Erfahrungen mit Expertensystemen sind bescheiden; einzig die Spielprogrammierung z.B. beim Schach hat zu bedeutenden Erfolgen geführt: Nur in den wenigen Fällen, wo die zu simulierende Tätigkeit bereits theoretisch gut verstanden war, kam es zum Durchbruch. Ansonsten nützte auch ein großer materieller und gedanklicher Aufwand wenig.

Eine ähnliche Kluft wie in der KI-Forschung zwischen außen glänzender Verpackung und teuren Versprechen und innen eher bescheidenen Ergebnissen bildet sich auch in den traditionelleren Zweigen der mathematisch-naturwissenschaftlichen Forschung mit dem Vordringen des "Darstellungspfektionismus", der sich den Forschungsgegenstand, die Methode, die Datenerhebung und die Art der Auswertung von den verfügbaren imposantesten elektronischen Werkzeugen bestimmen läßt.

Eine weitere Parallele zwischen KI-Forschung und der modernen instrumentellen Mathematik liegt in dem Riesenaufwand, der für neue Rechnerarchitekturen betrieben wird. Er bestätigt das Versagen der bisherigen Mittel der mathematischen Simulation in Naturwissenschaft und Technik und die extremen Erwartungen, die dennoch darauf gerichtet sind. Wieder finden wir z.B. bei den zellularen Automaten

---

Gray, *Finite Elements in Water Resources*, Springer-Verlag, Berlin (West) 1982.

<sup>85</sup> Vgl. W. Coy, a.a.O.; W. Coy, *Industrieroboter - Zur Archäologie der zweiten Schöpfung*, Rotbuch Verlag, Berlin (West) 1985; H. L. Dreyfus, S. E. Dreyfus, *Mind over Machine - The Power of Human Intuition and Expertise in the Era of the Computer*, Free Press, New York 1986, dt.: *Künstliche Intelligenz - Von den Grenzen der Denkmaschine und dem Wert der Intuition*, roro Computer, Rowohlt, Reinbek 1987; T. Winograd, F. Flores, *Understanding Computers and Cognition - A New Foundation for Design*, Ablex Publishing Corp., Norwood, N.J. 1986. Dort wird KI nicht von außen, nicht von einem allgemeinen, philosophischen Standpunkt abgekanzelt; die Verfasser, selbst ausgewiesen in unterschiedlichen Feldern der KI-Forschung, zeigen vielmehr konkret und im Einzelnen, wie illusionäre und verfehlte Konzepte notwendig Schiffbruch erleiden und erleiden mußten und nicht nur an der Rezession der 70er und 80er Jahre scheiterten.

einen erheblichen Aufwand, obwohl die Grundlagen nicht geklärt sind.<sup>36</sup>

**5 Absolute Erkenntnisschranken?** Bewegen wir uns zum Rand der Wissenschaft, so erscheinen immer eine Reihe von Problemen, die bei dem derzeitigen Stand unseres Wissens verwirrend sind. Das gilt nicht nur für die technischen Anwendungen, sondern auch in der Grundlagenforschung. Die große Beunruhigung, die von neuen grundwissenschaftlichen Erkenntnissen, Rätseln und Widersprüchen ausgeht, sollte als Vorbild für die noch weitgehend fehlende Sensibilität gegenüber interdisziplinären Fragen im Grenzbereich der Wissenschaft dienen und auf keinen Fall den Blick auf die unmittelbar viel folgenreicheren Schranken der Erkennbarkeit und Beherrschbarkeit verstellen, die im mathematisch-naturwissenschaftlich-technischen Alltag hervortreten. Dafür ist zuallererst eine nüchterne Sicht auf die fachinternen Erkenntnisprobleme nötig. Gegen die Neigung, zuweit gehende erkenntnistheoretische Konsequenzen aus diesen einzelwissenschaftlichen Resultaten oder Problemen zu ziehen, wollen wir die folgenden Thesen stellen:

1. Der Logiker Kurt Gödel hat in den 30er Jahren gezeigt, daß in jedem nicht zu engen formalen System "zwei seltsame Dinge" (H. Weyl) passieren: Es lassen sich arithmetische Sätze von verhältnismäßig elementarer Natur angeben, die richtig sind und doch innerhalb des Formalismus nicht abgeleitet werden können; und: gäbe es einen formellen Beweis der Widerspruchslosigkeit des gegebenen formalen Systems, so ließe sich daraus ein Widerspruch konstruieren. Damit hat Gödel wichtige Aussagen einmal über die Grenzen automatischer Beweisverfahren durch einen endlichen kombinatorischen Suchprozeß gemacht und des weiteren die Naturwissenschaftlern und materialistischen Philosophen wohl vertraute Unerschöpfbarkeit unserer Naturerkenntnis auch für ein so einfach erscheinendes künstliches Gedankengebilde, wie die natürlichen Zahlen, nachgewiesen.<sup>37</sup>

2. Neueren Datums ist die mathematischen Theorie des deterministischen Chaos dynamischer Systeme: Es wurden verhältnismäßig einfache gewöhnliche Differentialgleichungen entdeckt, bei denen kleinste Abweichungen der Anfangsbedingungen die Entwicklung der Zustände des Systems in weiter Zukunft entscheidend verändern können. Danach kann prinzipiell nicht ausgeschlossen werden, daß es z.B. für die Bildung von Großwetterlagen heute vielleicht Jahrhunderte zurückliegende kritische Augenblicke gibt, wo ein Schmetterling in Hintertupfung mit dem Schlag seiner Flügel entscheidet, ob ein atlantisches Störungstief über Labrador nun auf uns zukommt oder nach Süden abdreht. Tatsächlich wissen wir genug über thermische Fluktuationen, um nicht erst aus dem deterministischen Chaos Zweifel an der Zuverlässigkeit von Langzeitwettervorhersagen abzuleiten; und auf keinen Fall folgt daraus die prinzipielle Unvorhersagbarkeit aller mechanischer Systeme.<sup>38</sup>

<sup>36</sup> S. Wolfram, Cellular automaton supercomputing, Preprint, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1987.

<sup>37</sup> Vgl. H. Weyl, Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft, R. Oldenbourg, München 1966, 279-281; W. Heitsch, Mathematik und Weltanschauung, Akademie-Verlag, Berlin 1976, 208-213; G. Kreisel, Die formalistisch-positivistische Doktrin der mathematischen Präzision im Lichte der Erfahrung, in: M. Otte (Hrsg.), Mathematiker über die Mathematik, Springer-Verlag, Berlin (West) 1974, 65-120; hier 104f.

<sup>38</sup> Vgl. M. C. Mackey, L. Glass, Oscillation and chaos in physiological control systems, Science

3. Was besagt die moderne "Stringtheorie" des 10-dimensionalen Universums? Nicht den illusionären Charakter unserer vierdimensionalen Auffassung von Raum und Zeit, sondern die Annahme weiterer Dimensionen für den subatomaren Bereich, die für eine einheitliche Theorie von Gravitation, Elektromagnetismus und schwacher und starker Wechselwirkungen hilfreich erscheinen, aber nur bei hypothetischen Beschleunigern mit Energien von astrophysikalischer Größenordnung im Experiment beobachtbar sind.<sup>39</sup>

4. Was besagt das Aspectexperiment im Bohr-Einstein-Streit über den "Realismus" der Quantenmechanik? Nicht die Schaffung von Geschichte und Universum durch den messenden Quantenmechaniker, nicht die Auflösung von Raum und Zeit, sondern das einstweilen unerklärliche Polarisationsverhalten von zwei "ähnlichen" Photonen: Nach Einwirkung auf das eine Photon ändert sich das Verhalten des anderen, das sich mit Lichtgeschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung entfernt hatte, ohne daß wir den Charakter der Informationsübertragung durch die Meßapparatur oder zwischen den beiden Photonen kennen.<sup>40</sup>

### 6 Gesellschaftliche Ethik wissenschaftlich-technischer Veränderungen.

"Zweifel" und "Risiko" wurden zu ethischen Kernbegriffen der modernen mathematisch-naturwissenschaftlichen Berechnungen. Der "Zweifel", weil der Charakter der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung es mit sich bringt, daß die möglichen Antworten nur vorläufige Antworten sind. "Risiko", da bei Strafe des Unterganges der Art oder vieler Menschen in die um uns ablaufenden Prozesse eingegriffen werden muß. Also: "Zweifel", da wir mit nicht-perfekten Werkzeugen, Modellen arbeiten müssen. "Risiko", da wir aus den Modellen Handlungslinien ableiten müssen, die möglicherweise später zu korrigieren sind.<sup>41</sup>

6A Zweifel und Risiko. Vom Standpunkt des Naturwissenschaftlers und Mathematikers läßt sich der "Zweifel" an einer vorgeschlagenen Lösung und damit das mit der Lösung verbundene Risiko aus zwei Dingen abschätzen, aus dem Grad der Einbettung des verwendeten Modells in sein empirisches und theoretisches Umfeld und aus der Unschärfe mit der die verwendeten Gleichsetzungen im Modell formuliert wurden. Modellergebnisse extremer Situationen sind schlechter eingebettet

---

197 (16.7.1977), 267-268; D. Ruelle, The Lorenz attractor and the problem of turbulence, in: A. Dold, B. Eckmann (Hrsg.), Turbulence and Navier-Stokes Equation (Orsay 1975), Springer-Verlag, Berlin 1976; dem., Turbulent dynamic systems, Proceedings of the International Congress of Mathematicians, August 1983, Warszawa, Polish Scientific Publishers, Warszawa und North-Holland, Amsterdam 1984; E. N. Lorenz, Irregularity: a fundamental property of the atmosphere, Tellus 30A (1984), 98-110.

<sup>39</sup> S. Anthony, Superstrings: a theory of everything? New Scientist 29. 8. 1985, 34f.

<sup>40</sup> Vgl. A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, Can quantummechanical description of physical reality be considered complete? Phys. Rev. 47 (1935), 777-780; die volle Serie der Orsay-Experimente (Experimental tests of realistic local theories via Bell's theorem) ist beschrieben in: A. Aspect, P. Grangier, Proc. Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo 1983, 215-224; P. V. Christensen, Retur til virkligheden, Gamma - Tidsskrift for fysik 52 (marts 1983); vom gl. Verf.: The Classification of Quantum-Non-Locality, IMFUFATEKST nr. 93/1985.

<sup>41</sup> "Wir können nicht hoffen, daß nichts geschieht" aus "Ein bißchen Frieden" ist eben in allen Richtungen ein bißchen zu wenig, vgl. J. Brandt, Om afgrunden mellem landskabsøkologi og landskabsplanlægning, vevliksfältigt, Roskilde 1987.

und mit grösserer Unschärfe behaftet, d.h. Aussagen eines Modells für normale und extreme Situationen sind nicht gleichwertig. Da in der Regel die negativen Auswirkungen von Fehlverhalten in extremen Situationen schwerwiegender sind als die von Fehlverhalten in normalen Situationen - man denke an das Verhalten der Bedienungsmannschaft im Kernkraftwerk Tschernobyl<sup>42</sup> - sinkt die Vorhersagequalität des Modelles nicht nur im Takt mit der Abweichung von der Normalsituation, sondern schneller.

Hier streifen wir das Gebiet der Psychologie. Der Umfang der Umweltkatastrophe und die widersprüchliche Stellung der großen Mehrheit der Menschheit dazu als bewußtlose Täter und Opfer legt die Parallele nahe zu dem Inferno, das die deutschen Soldaten im Zweiten Weltkrieg letztendlich sich selbst bereiteten. Historiker definieren dabei die faschistische Manipulation als zusammenhängendes System von Terror, Ideologie und Korruption.<sup>43</sup> Danach reicht der Terror nicht für die Erklärung aus, wieso die deutschen Soldaten im Zweiten Weltkrieg so lange dem Nationalsozialismus die Treue hielten und die Augen vor der sich spätestens mit Stalingrad abzeichnenden militärischen Niederlage verschlossen. Noch mehr als zwei Jahre ging der Krieg danach weiter; immer unerbittlicher; noch viele weitere Millionen deutscher Soldaten ließen sich abschlachten oder invalidisieren. Warum liefen nur so wenige über und retteten ihr Leben? Vermutlich versuchten sie, nicht an ihr Ende oder das Kriegsende zu denken. Vermutlich setzten sie noch immer auf die technologische Lösung, die Wunderwaffe, oder das politische Wunder, das Auseinanderbrechen der Anti-Hitler-Koalition oder die unmerkliche Ablösung des eigenen Regimes, Separatfrieden im Westen etc. etc. Erleben wir heute nicht ganz ähnliche Verdrängungen, das Warten auf den technischen "Fix" oder das politische Wunder, wenn es um die Beraubung der Zukunft für die nächste Generation und vielleicht schon die Untergrabung der eigenen Lebensgrundlagen geht?<sup>44</sup>

Besitzer, Benutzer oder Nachbar von Gegenständen oder Einrichtungen - seien es Glühlampen, Autos, Milchtüten, Krane, Fischteiche oder Kernkraftwerke - die nach einem bestimmten Modell entworfen wurden und wirken, stehen vor der Frage: Wie groß muß das Risiko für euch werden, damit ihr euer Interesse an den Grundlagen des Modells artikuliert und eine Fähigkeit zur Beurteilung von Komplexität, von Vernetzungen, Pufferungen und Berechnungen extremer Situationen erwirbt und

---

<sup>42</sup> B. Goss Levi, Soviets assess cause of Chernobyl accident, *Physics Today*, December 1986, 17-20.

<sup>43</sup> So K. Pätzold, Die faschistische Manipulation des deutschen Volkes. Zu einem Forschungsproblem. In: W. Kowalski (Hrsg.), *Soziale Grundlagen und Herrschaftsmechanismen des deutschen Faschismus. Der antifaschistische Kampf*, Teil 1, Wiss. Beiträge 1980/42 (C16) der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle 1980, 48ff

<sup>44</sup> Diese Einsicht in vermeintliche Notwendigkeiten, diese sich vernünftig gebende Entschlossenheit, einmal Angefangenes zuende zu bringen, dies Fehlen der Fähigkeit zur Umkehr, zur Korrektur, dieser Glaube an technische Möglichkeiten, der die Lizenz zum Schließen der Augen gibt, werden von Dreyfus u. Dreyfus (a.a.O.) als Tunnelvision charakterisiert: "Eine allgemeine, organisierende Perspektive, unverzichtbarer Bestandteil des intuitiven Verstehens, kann ... auch zur Katastrophe führen. Tunnelperspektive nennt man eine solche trotz anhaltender beunruhigender Anzeichen aufrechterhaltene Perspektive. Etwas aus der Tunnelperspektive zu betrachten heißt, eine mögliche neue Perspektive zu übersehen, die jüngste Ereignisse besser erklären und künftige Handlungen angemessener festlegen würde."

anwendet? Niemand wird euch letztlich diese Verantwortung abnehmen können. Und es wird keinen anderen Weg zu einem verantwortlichen Handeln geben als durch die Massenaufklärung und -mobilisierung, durch den Kopf, nicht durchs Gefühl, nicht durch die Religion und hoffentlich auch nicht durch zu brutale plötzliche Katastrophen.

Wann kommt es endlich zu einer demokratischen Neubewertung der Materialintensität und -umlaufgeschwindigkeit? Sämtliche Materialflüsse müssen analysiert und umgestaltet werden: in der Konsumtion (einschließlich des Militärs als Konsumtion), in der Produktion - und bei der Verwaltung der Altlasten, die einen rasch wachsenden Aufwand hier zur Heilung, Entsorgung und Entgiftung, dort zur Siechenpflege, Überbrückung und Absperrung erfordern?<sup>45</sup>

6B Wie soll es weitergehen?. Wir waren angetreten, um einen Bericht von der Innenseite der mathematisch-naturwissenschaftlich-technischen Forschung zu geben. Darüber hinausgehenden wissenschaftlich technischen oder gesellschaftlichen Optimismus können wir nicht liefern. Genauer:

1. Die Auswirkungen des Produktionsapparates auf die Lebensumstände der Menschheit sind so massiv geworden, daß die sorglose Pragmatik, alles nach seiner eigenen Dynamik laufen zu lassen, überholt ist. Wird es im Wettlauf mit der Zeit gelingen, unsere Wechselwirkung mit der Natur von der Atomrüstung bis zu den Konsumgewohnheiten auf einen nach unseren Wertmaßstäben akzeptablen Zustand (wir meinen damit ein materiell abgesichertes und kulturell reiches Leben unter Verzicht auf viele gewohnte Konsumgüter) umzustellen? Man ist schon Optimist, wenn man das noch als offene Frage ansieht. Wer - und sei es auch im Glauben und im Kampf für eine bessere Zukunft - eine positive Antwort unterstellt, ist kein Held, sondern unwissend, macht keine Hoffnung für den Sozialismus, sondern diskreditiert den wissenschaftlichen Sozialismus, macht ihn lächerlich.

Hoffen wir also, daß es noch nicht zu spät ist, die Risikobereitschaft im Militärwesen, in der Industrie, in der Tier- und Pflanzenproduktion, im Umgang mit neuen Stoffen und Verfahren drastisch zu senken.

2. Fortschritte in der Erkenntnis, in Kompetenz, Kritik und Zweifel, dürfen nicht der Resignation zugute kommen, sondern müssen zu ihrer Ablösung durch bewußtes Handeln, darunter auch bewußtes Eingreifen und Anhalten führen.

3. Nicht Fortschritte der Wissenschaft an sich, auch nicht eigentlich die beglei-

---

<sup>45</sup> Vgl. H. Roos, *Geographische Berichte* 80 (1976), Nr. 3, 179-189, wo vor dem Zurückbleiben der Stoffausnutzung im Verhältnis zur Stoffumsetzung gewarnt wurde. Roos fand darin ein charakteristisches Mißverhältnis für die vorherrschende Gestaltung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts in den hochindustrialisierten Ländern, kapitalistischen wie sozialistischen. In Übereinstimmung mit sowjetischen Studien und Regierungserklärungen aus den Jahren (und tatsächlich in Verlängerung und Konkretisierung älterer progressiver US-amerikanischer Analysen wie B. Commoner's, *The Closing Circle*, Jonathan Cape, London 1972) forderte Roos eine Reorganisation von Produktion und Konsumtion nach dem Prinzip der geschlossenen Stoffkreisläufe. Vgl. auch H. Roos, G. Streibel, *Umweltgestaltung und Ökonomie der Naturressourcen*, Verlag Die Wirtschaft, Berlin 1979, und weiter u.a. H. Paucke, G. Streibel, *Wirtschaftswiss.* 28 (1980), 405-421. Es muß unbedingt untersucht werden, warum so wenig aus diesen scharfsinnigen Analysen und Forderungen in der Praxis des Sozialismus wurde.



tenden immer neuen Grenzen unseres Wissens, sondern die verantwortungslose Ignorierung dieser Grenzen haben unerträgliche Risiken in unser Leben gebracht. Daraus folgen neue Anforderungen an die polytechnische, aber auch an die politische, ökonomische und ethische Allgemeinbildung. Es liegt ja nicht so sehr an Unsicherheiten der Reaktortechnik, noch immer fehlendem Wissen über ökonomische Filter für Kohlekraftwerke und Müllverbrennungsanlagen und nicht immer am Profitsystem und am Privateigentum, wenn wir Menschen großen gesundheitlichen Belastungen und Risiken aussetzen. Es liegt viel mehr an dem mangelnden Interesse und mangelnder Verantwortung gegenüber den Nah- und Fernwirkungen unseres Tuns - wenn wir z.B. im Verlauf von Jahrzehnten von der Jahrtausende alten Gewohnheit der Menschen abgehen, sich im Winter warm anzuziehen, und stattdessen lieber den Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen radikal erhöhen.

4. Ist es kein naturwissenschaftliches Problem, so ist es auch kein ausschließlich moralisches Problem. Gegen die Freude am Gewinn, der Interesse und Verantwortung für die Folgen verdrängt, kann man genau so erfolglos moralisieren wie gegen die resignative Haltung, die - angesichts bestehender Schwierigkeiten bei der Herbeiführung von Veränderungen - es aufgibt, alle Grundlagen und Folgen des eigenen Tuns selbst abzuschätzen. Wird die Verantwortungslosigkeit und Interesselosigkeit in unserer überholten Gesellschaftsordnung auch mit allen Mitteln gefördert, so zeigt doch die jüngste Diskussion in der Sowjetunion, daß alles schwierig genug bleibt - selbst wenn die gesellschaftlichen Propagandamittel über Jahrzehnte in entgegengesetzter Richtung eingesetzt waren. Wir müssen also auch bei uns und zwar schon jetzt gesellschaftliche Veränderungen einleiten, die der Verantwortungslosigkeit und Interesselosigkeit in ihren unterschiedlichen Bedingungen und Ausprägungen entgegenwirken.

5. Wenn wir also etwas von unserer wissenschaftstheoretischen Diskussion verallgemeinern können, dann ist es das Problem der Komplexität: So wie die Modellierung von Einzelaspekten verhältnismäßig gut gelingt und die meisten Unsicherheiten aus dem unkontrollierbaren Zusammenwirken oder der unsachgerechten Dominanz von einzeln gesehen vernünftigen Ansätzen entstehen, müssen auch gesellschaftliche Verhältnisse geschaffen werden, bei denen die zügellose Vernetzung aller Lebensbereiche begrenzt wird<sup>46</sup> und durch eine geeignete gesellschaftliche Organ-

---

<sup>46</sup> Vgl. die eindrucksvolle Warnung von Marx davor, bei der "Vernetzung" durch den Weltmarkt, dem "sachlichen Zusammenhang", stehenzubleiben: "Es ist gesagt worden und mag gesagt werden, daß das Schöne und Große eben in diesem naturwüchsigen, vom Wissen und Wollen der Individuen unabhängigen, und gerade ihre wechselseitige Unabhängigkeit und Gleichgültigkeit gegeneinander voraussetzenden Zusammenhang, materiellen und geistigen Stoffwechsel, beruht. Und sicher ist dieser sachliche Zusammenhang ihrer Zusammenhangslosigkeit vorzuziehen oder einem auf Bluturenge Natur und Herrschafts- und Knechtschaftsverhältnisse gegründeten nur lokalen Zusammenhang. Es ist ebenso sicher, daß die Individuen sich ihre eignen gesellschaftlichen Zusammenhänge nicht unterordnen können, bevor sie dieselben geschaffen haben. Aber es ist abgeschmackt, jenen nur *sachlichen Zusammenhang* als den naturwüchsigen, von der Natur der Individualität (im Gegensatz zum Reflektierten Wissen und Wollen) unzertrennlichen und ihr immanenten, aufzufassen. Er ist ihr Produkt. Er ist ein historisches Produkt. Er gehört einer bestimmten Phase ihrer Entwicklung an. Die Fremdartigkeit und Selbständigkeit, worin er noch gegen sie existiert, beweist nur, daß sie noch in der Schöpfung der Bedingungen ihres sozialen

isation die persönliche Verantwortung, das persönliche Interesse, die persönlichen und damit letztlich auch die gesellschaftlichen Handlungsmöglichkeiten erweitert werden.

B. B.-B., Institut for matematik og fysik, Roskilde Universitetscenter, Postboks 260, DK-4000 Roskilde

M. B.-C., Institut für Meereskunde, Troplowitzstr. 7, D-2000 Hamburg 54

---

Lebens begriffen sind, statt von diesen Bedingungen aus es begonnen zu haben. Es ist der Zusammenhang, der naturwüchsige, von Individuen innerhalb bestimmter, bornierter Produktionsverhältnisse. Die universal entwickelten Individuen, deren gesellschaftliche Verhältnisse als ihre eignen, gemeinschaftlichen Beziehungen auch ihrer eignen gemeinschaftlichen Kontrolle unterworfen sind, sind kein Produkt der Natur, sondern der Geschichte. Der Grad und die Universalität der Entwicklung der Vermögen, worin *diese* Individualität möglich wird, setzt eben die Produktion auf der Basis der Tauschwerte voraus, die mit der Allgemeinheit die Entfremdung des Individuums von sich und von anderen, aber auch die Allgemeinheit und Allseitigkeit seiner Beziehungen und Fähigkeiten erst produziert. Auf früheren Stufen der Entwicklung erscheint das einzelne Individuum voller, weil es eben die Fülle seiner Beziehungen noch nicht herausgearbeitet und als von ihm unabhängige gesellschaftliche Mächte und Verhältnisse sich gegenübergestellt hat. So lächerlich es ist, sich nach jener ursprünglichen Fülle zurückzusehnen, so lächerlich ist der Glaube bei jener vollen Entleerung stehnbleiben zu müssen. Über den Gegensatz gegen jene romantische Ansicht ist die bürgerliche nie herausgekommen und darum wird jene als berechtigter Gegensatz sie bis an ihr seliges Ende begleiten." K. Marx, Grundrisse der Kritik der politischen Ökonomie, Verlag für fremdsprachige Literatur, Moskau 1939, 79-80.

- 1/78 "TANKER OM EN PRAKSIS" - et matematikprojekt. Projekt rapport af: Anne Jensen, Lena Lindenskov, Marianne Kesselhahn og Nicolai Lomholt. Vejleder: Anders Madsen
- 2/78 "OPTIMERING" - Menneskets forøgede beherskelsesmuligheder af natur og samfund. Projekt rapport af: Tom J. Andersen, Tommy R. Andersen, Gert Krenøe og Peter H. Lassen. Vejleder: Bernhelm Boss.
- 3/78 "OPGAVESAMLING", breddekursus i fysik. Af: Lasse Rasmussen, Aage Bonde Kræmmer og Jens Højgaard Jensen.
- 4/78 "TRE ESSAYS" - om matematikundervisning, matematiklæreruddannelsen og videnskabsrindalismen. Af: Mogens Niss. Nr. 4 er p.t. udgået.
- 5/78 "BIBLIOGRAFISK VEJLEDNING til studiet af DEN MODERNE FYSIKS HISTORIE". Af: Helge Kragh. Nr. 5 er p.t. udgået.
- 6/78 "NOGLE ARTIKLER OG DEBATINDLÆG OM - læreruddannelse og undervisning i fysik, og - de naturvidenskabelige fags situation efter studenteroprøret". Af: Karin Beyer, Jens Højgaard Jensen og Bent C. Jørgensen.
- 7/78 "MATEMATIKKENS FORHOLD TIL SAMFUNDSØKONOMIEN". Af: B.V. Gnedenko. Nr. 7 er udgået.
- 8/78 "DYNAMIK OG DIAGRAMMER". Introduktion til energy-bond-graph formalismen. Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 9/78 "OM PRAKSIS' INDFLYDELSE PÅ MATEMATIKKENS UDVIKLING". - Motiver til Kepler's: "Nova Stereometria Doliorum Vinarium". Projekt rapport af: Lasse Rasmussen. Vejleder: Anders Madsen.
- 
- 10/79 "THERMODYNAMIK I GYMNASIET". Projekt rapport af: Jan Christensen og Jeanne Mortensen, Vejledere: Karin Beyer og Peder Voetmann Christiansen.
- 11/79 "STATISTISKE MATERIALER". Af: Jørgen Larsen.
- 12/79 "LINEÆRE DIFFERENTIALLIGNINGER OG DIFFERENTIALLIGNINGSSYSTEMER". Af: Mogens Brun Heefelt. Nr. 12 er udgået.
- 13/79 "CAVENDISH'S FORSØG I GYMNASIET". Projekt rapport af: Gert Kreinøe. Vejleder: Albert Chr. Paulsen.
- 14/79 "BOOKS ABOUT MATHEMATICS: History, Philosophy, Education, Models, System Theory, and Works of". Af: Else Høyrup. Nr. 14 er p.t. udgået.
- 15/79 "STRUKTUREL STABILITET OG KATASTROFER i systemer i og udenfor termodynamisk ligevægt". Specialeopgave af: Leif S. Striegler. Vejleder: Peder Voetmann Christiansen.
- 16/79 "STATISTIK I KRÆFTFORSKNINGEN". Projekt rapport af: Michael Olsen og Jørn Jensen. Vejleder: Jørgen Larsen.
- 17/79 "AT SPØRGE OG AT SVARE i fysikundervisningen". Af: Albert Christian Paulsen.
- 18/79 "MATHEMATICS AND THE REAL WORLD", Proceedings af an International Workshop, Roskilde University Centre, Denmark, 1978. Preprint. Af: Bernhelm Booss og Mogens Niss (eds.)
- 19/79 "GEOMETRI, SKOLE OG VIRKELIGHED". Projekt rapport af: Tom J. Andersen, Tommy R. Andersen og Per H.H. Larsen. Vejleder: Mogens Niss.
- 20/79 "STATISTISKE MODELLER TIL BESTEMMELSE AF SIKRE DOSER FOR CARCINOGENE STOFFER". Projekt rapport af: Michael Olsen og Jørn Jensen. Vejleder: Jørgen Larsen
- 21/79 "KONTROL I GYMNASIET-FORMÅL OG KONSEKVENSER". Projekt rapport af: Crilles Bacher, Per S. Jensen, Preben Jensen og Torben Nysteen.
- 22/79 "SEMIOTIK OG SYSTEMEGENSKABER (1)". 1-port lineært response og støj i fysikken. Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 23/79 "ON THE HISTORY OF EARLY WAVE MECHANICS - with special emphasis on the role of reality". Af: Helge Kragh.
- 
- 24/80 "MATEMATIKOPFATTELSE hos 2.G'ERE". a+b 1. En analyse. 2. Interviewmateriale. Projekt rapport af: Jan Christensen og Knud Lindhardt Rasmussen. Vejleder: Mogens Niss.
- 25/80 "EKSAMENSOPGAVER", Dybdemodul/fysik 1974-79.
- 26/80 "OM MATEMATISKE MODELLER". En projekt rapport og to artikler. Af: Jens Højgaard Jensen m.fl.
- 27/80 "METHODOLOGY AND PHILOSOPHY OF SCIENCE IN PAUL DIRAC'S PHYSICS". Af: Helge Kragh.
- 28/80 "DIELEKTRISK RELAXATION - et forslag til en ny model bygget på væskemes viscoelastiske egenskaber". Projekt rapport af: Gert Kreinøe. Vejleder: Niels Boye Olsen.
- 29/80 "ODIN - undervisningsmateriale til et kursus i differentiaalligningsmodeller". Projekt rapport af: Tommy R. Andersen, Per H.H. Larsen og Peter H. Lassen. Vejleder: Mogens Brun Heefelt.
- 30/80 "FUSIONSENERGIEN - - - ATOMSAMFUNDETS ENDESTATION". Af: Oluf Danielsen. Nr. 30 er udgået.
- 31/80 "VIDENSKABSTEORETISKE PROBLEMER VED UNDERVISNINGSSYSTEMER BASERET PÅ MÆNGDELÆRE". Projekt rapport af: Troels Lange og Jørgen Karrebæk. Vejleder: Stig Andur Pedersen. Nr. 31 er p.t. udgået.
- 32/80 "POLYMERE STOFFERS VISCOELASTISKE EGENSKABER - BELYST VED HJÆLP AF MEKANISKE IMPEDANSMÅLINGER - MØSSBAUEREFFEKT MÅLINGER". Projekt rapport af: Crilles Bacher og Preben Jensen. Vejledere: Niels Boye Olsen og Peder Voetmann Christiansen.
- 33/80 "KONSTITUERING AF FAG INDEN FOR TEKNISK - NATURVIDENSKABELIGE UDDANNELSER. I-II". Af: Arne Jakobsen.
- 34/80 "ENVIRONMENTAL IMPACT OF WIND ENERGY UTILIZATION". ENERGY SERIES NO. I. Af: Bent Sørensen. Nr. 34 er udgået.

- 35/80 "HISTORISKE STUDIER I DEN NYERE ATOMFYSIKS UDVIKLING".  
Af: Helge Kragh.
- 36/80 "HVAD ER MENINGEN MED MATEMATIKUNDERVISNINGEN?".  
Fire artikler.  
Af: Mogens Niss.
- 37/80 "RENEWABLE ENERGY AND ENERGY STORAGE".  
ENERGY SERIES NO. 2.  
Af: Bent Sørensen.
- 
- 38/81 "TIL EN HISTORIE TEORI OM NATURERKENDELSE, TEKNOLOGI OG SAMFUND".  
Projekt rapport af: Erik Gade, Hans Medal, Henrik Lau og Finn Physant.  
Vejledere: Stig Andur Pedersen, Helge Kragh og Ib Thiersen.  
Nr. 38 er p.t. udgået.
- 39/81 "TIL KRITIKKEN AF VÆKSTØKONOMIEN".  
Af: Jens Højgaard Jensen.
- 40/81 "TELEKOMMUNIKATION I DANMARK - oplæg til en teknologivurdering".  
Projekt rapport af: Arne Jørgensen, Bruno Petersen og Jan Vedde.  
Vejleder: Per Nørgaard.
- 41/81 "PLANNING AND POLICY CONSIDERATIONS RELATED TO THE INTRODUCTION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO ENERGY SUPPLY SYSTEMS".  
ENERGY SERIES NO. 3.  
Af: Bent Sørensen.
- 42/81 "VIDENSKAB TEORI SAMFUND - En introduktion til materialistiske videnskabsopfattelser".  
Af: Helge Kragh og Stig Andur Pedersen.
- 43/81 1. "COMPARATIVE RISK ASSESSMENT OF TOTAL ENERGY SYSTEMS".  
2. "ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF DECENTRALIZATION".  
ENERGY SERIES NO. 4.  
Af: Bent Sørensen.
- 44/81 "HISTORISKE UNDERSØGELSER AF DE EKSPERIMENTELLE FORUDSÆTNINGER FOR RUTHERFORDS ATOMMODEL".  
Projekt rapport af: Niels Thor Nielsen.  
Vejleder: Bent C. Jørgensen.
- 
- 45/82 Er aldrig udkommet.
- 46/82 "EKSEMPLARISK UNDERVISNING OG FYSISK ERKENDELSE-  
1+1 ILLUSTRERET VED TO EKSEMPLER".  
Projekt rapport af: Torben O. Olsen, Lasse Rasmussen og Niels Dreyer Sørensen.  
Vejleder: Bent C. Jørgensen.
- 47/82 "BARSEBÄCK OG DET VÆRST OFFICIELT-TÆNKELIGE UHELD".  
ENERGY SERIES NO. 5.  
Af: Bent Sørensen.
- 48/82 "EN UNDERSØGELSE AF MATEMATIKUNDERVISNINGEN PÅ ADGANGSKURSUS TIL KØBENHAVNS TEKNIKUM".  
Projekt rapport af: Lis Eilertzen, Jørgen Karrebæk, Troels Lange, Preben Nørregaard, Lissi Pedesen, Laust Rishøj, Lill Røn og Isac Showlki.  
Vejleder: Mogens Niss.
- 49/82 "ANALYSE AF MULTISPEKTRALE SATELLITBILLEDER".  
Projekt rapport af: Preben Nørregaard.  
Vejledere: Jørgen Larsen og Rasmus Ole Rasmussen.
- 50/82 "HERSLEV - MULIGHEDER FOR VEDVARENDE ENERGI I EN LANDSBY".  
ENERGY SERIES NO. 6.  
Rapport af: Bent Christensen, Bent Hove Jensen, Dennis B. Møller, Bjarne Laurson, Bjarne Lillethorup og Jacob Mørch Pedersen.  
Vejleder: Bent Sørensen.
- 51/82 "HVAD KAN DER Gøres FOR AT AFHJÆLPE PIGERS BLOKERING OVERFOR MATEMATIK?".  
Projekt rapport af: Lis Eilertzen, Lissi Pedersen, Lill Røn og Susanne Stender.
- 52/82 "DESUSPENSION OF SPLITTING ELLIPTIC SYMBOLS".  
Af: Bernhelm Booss og Krzysztof Wojciechowski.
- 53/82 "THE CONSTITUTION OF SUBJECTS IN ENGINEERING EDUCATION".  
Af: Arne Jacobsen og Stig Andur Pedersen.
- 54/82 "FUTURES RESEARCH" - A Philosophical Analysis of Its Subject-Matter and Methods.  
Af: Stig Andur Pedersen og Johannes Witt-Hansen.
- 55/82 "MATEMATISKE MODELLER" - Litteratur på Roskilde Universitetsbibliotek.  
En biografi.  
Af: Else Højrup.  
Vedr. tekst nr. 55/82 se også tekst nr. 62/83.
- 56/82 "EN - TO - MANGE" -  
En undersøgelse af matematisk økologi.  
Projekt rapport af: Troels Lange.  
Vejleder: Anders Madsen.
- 
- 57/83 "ASPECT EKSPERIMENTET"-  
Skjulte variable i kvantemekanikken?  
Projekt rapport af: Tom Juul Andersen.  
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen.  
Nr. 57 er udgået.
- 58/83 "MATEMATISKE VANDRINGER" - Modelbetragtninger over spredning af dyr mellem småbiotoper i agerlandet.  
Projekt rapport af: Per Hammershøj Jensen og Lene Vagn Rasmussen.  
Vejleder: Jørgen Larsen.
- 59/83 "THE METHODOLOGY OF ENERGY PLANNING".  
ENERGY SERIES NO. 7.  
Af: Bent Sørensen.
- 60/83 "MATEMATISK MODEKSPERTISE"- et eksempel.  
Projekt rapport af: Erik O. Gade, Jørgen Karrebæk og Preben Nørregaard.  
Vejleder: Anders Madsen.
- 61/83 "FYSIKS IDEOLOGISKE FUNKTION, SOM ET EKSEMPEL PÅ EN NATURVIDENSKAB - HISTORISK SET".  
Projekt rapport af: Annette Post Nielsen.  
Vejledere: Jens Højrup, Jens Højgaard Jensen og Jørgen Vogelius.
- 62/83 "MATEMATISKE MODELLER" - Litteratur på Roskilde Universitetsbibliotek.  
En biografi 2. rev. udgave.  
Af: Else Højrup.
- 63/83 "CREATING ENERGY FUTURES: A SHORT GUIDE TO ENERGY PLANNING".  
ENERGY SERIES No. 8.  
Af: David Crossley og Bent Sørensen.
- 64/83 "VON MATEMATIK UND KRIEG".  
Af: Bernhelm Booss og Jens Højrup.
- 65/83 "ANVENDT MATEMATIK - TEORI ELLER PRAKSIS".  
Projekt rapport af: Per Hedegård Andersen, Kirsten Habekost, Carsten Holst-Jensen, Annelise von Moos, Else Marie Pedersen og Erling Møller Pedersen.  
Vejledere: Bernhelm Booss og Klaus Grünbaum.
- 66/83 "MATEMATISKE MODELLER FOR PERIODISK SELEKTION I ESCHERICHIA COLI".  
Projekt rapport af: Hanne Lisbet Andersen, Ole Richard Jensen og Klavs Frisdahl.  
Vejledere: Jørgen Larsen og Anders Hede Madsen.
- 67/83 "ELEPSOIDE METODEN - EN NY METODE TIL LINEÆR PROGRAMMERING?".  
Projekt rapport af: Lone Billmann og Lars Boye.  
Vejleder: Mogens Brun Heefelt.
- 68/83 "STOKASTISKE MODELLER I POPULATIONSGENETIK" - til kritikken af teoriladede modeller.  
Projekt rapport af: Lise Odgård Gade, Susanne Hansen, Michael Hviid og Frank Mølgård Olsen.  
Vejleder: Jørgen Larsen.

- 69/83 "ELEVFORUDSÆTNINGER I FYSIK"  
- en test i l.g med kommentarer.  
Af: Albert C. Paulsen.
- 70/83 "INDLÆRINGS - OG FORMIDLINGSPROBLEMER I MATEMATIK PÅ VOKSENUNDERVISNINGSNIVEAU".  
Projektrapport af: Hanne Lisbet Andersen, Torben J. Andreasen, Svend Åge Houmann, Helle Glerup Jensen, Keld Fl. Nielsen, Lene Vagn Rasmussen.  
Vejleder: Klaus Grünbaum og Anders Hede Madsen.
- 71/83 "PIGER OG FYSIK"  
- et problem og en udfordring for skolen?  
Af: Karin Beyer, Sussanne Blegaa, Birthe Olsen, Jette Reich og Mette Vedelsby.
- 72/83 "VERDEN IFØLGE PEIRCE" - to metafysiske essays, om og af C.S Peirce.  
Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 73/83 ""EN ENERGIANALYSE AF LANDBRUG"  
- økologisk contra traditionelt.  
ENERGY SERIES NO. 9  
Specialeopgave i fysik af: Bent Hove Jensen.  
Vejleder: Bent Sørensen.
- 
- 74/84 "MINIATURISERING AF MIKROELEKTRONIK" - om videnskabeliggjort teknologi og nytten af at lære fysik.  
Projektrapport af: Bodil Harder og Linda Szkotak Jensen.  
Vejledere: Jens Højgaard Jensen og Bent C. Jørgensen.
- 75/84 "MATEMATIKUNDERVISNINGEN I FREMTIDENS GYMNASIUM"  
- Case: Lineær programmering.  
Projektrapport af: Morten Blomhøj, Klavs Frisdahl og Frank Mølgaard Olsen.  
Vejledere: Mogens Brun Heefelt og Jens Bjørneboe.
- 76/84 "KERNEKRAFT I DANMARK?" - Et høringssvar indkaldt af miljøministeriet, med kritik af miljøstyrelsens rapporter af 15. marts 1984.  
ENERGY SERIES No. 10  
Af: Niels Boye Olsen og Bent Sørensen.
- 77/84 "POLITISKE INDEKS - FUP ELLER FAKTA?"  
Opinionsundersøgelser belyst ved statistiske modeller.  
Projektrapport af: Svend Åge Houmann, Keld Nielsen og Susanne Stender.  
Vejledere: Jørgen Larsen og Jens Bjørneboe.
- 78/84 "JÆVNSTRØMSLEDNINGSEVNE OG GITTERSTRUKTUR I AMORFT GERMANIUM".  
Specialrapport af: Hans Hedal, Frank C. Ludvigsen og Finn C. Physant.  
Vejleder: Niels Boye Olsen.
- 79/84 "MATEMATIK OG ALMENDANNELSE".  
Projektrapport af: Henrik Coster, Mikael Wennerberg Johansen, Povl Kattler, Birgitte Lydholm og Morten Overgaard Nielsen.  
Vejleder: Bernhelm Booss.
- 80/84 "KURSUSMATERIALE TIL MATEMATIK B".  
Af: Mogens Brun Heefelt.
- 81/84 "FREKVENSAFHÆNGIG LEDNINGSEVNE I AMORFT GERMANIUM".  
Specialrapport af: Jørgen Wind Petersen og Jan Christensen.  
Vejleder: Niels Boye Olsen.
- 82/84 "MATEMATIK - OG FYSIKUNDERVISNINGEN I DET AUTOMATISEREDE SAMFUND".  
Rapport fra et seminar afholdt i Hvidovre 25-27 april 1983.  
Red.: Jens Højgaard Jensen, Bent C. Jørgensen og Mogens Niss.
- 83/84 "ON THE QUANTIFICATION OF SECURITY":  
PEACE RESEARCH SERIES NO. 1  
Af: Bent Sørensen  
nr. 83 er p.t. udgået
- 84/84 "NOGLE ARTIKLER OM MATEMATIK, FYSIK OG ALMENDANNELSE".  
Af: Jens Højgaard Jensen, Mogens Niss m. fl.
- 85/84 "CENTRIFUGALREGULATORER OG MATEMATIK".  
Specialrapport af: Per Hedegård Andersen, Carsten Holst-Jensen, Else Marie Pedersen og Erling Møller Pedersen.  
Vejleder: Stig Andur Pedersen.
- 86/84 "SECURITY IMPLICATIONS OF ALTERNATIVE DEFENSE OPTIONS FOR WESTERN EUROPE".  
PEACE RESEARCH SERIES NO. 2  
Af: Bent Sørensen.
- 87/84 "A SIMPLE MODEL OF AC HOPPING CONDUCTIVITY IN DISORDERED SOLIDS".  
Af: Jeppe C. Dyre.
- 88/84 "RISE, FALL AND RESURRECTION OF INFINITESIMALS".  
Af: Detlef Laugwitz.
- 89/84 "FJERNVARMEOPTIMERING".  
Af: Bjarne Lillethorup og Jacob Mørch Pedersen.
- 90/84 "ENERGI I L.G - EN TEORI FOR TILRETTELÆGGELSE".  
Af: Albert Chr. Paulsen.
- 
- 91/85 "KVAANTETEORI FOR GYMNASIET".  
1. Lærervejledning  
Projektrapport af: Biger Lundgren, Henning Sten Hansen og John Johansson.  
Vejleder: Torsten Meyer.
- 92/85 "KVAANTETEORI FOR GYMNASIET".  
2. Materiale  
Projektrapport af: Biger Lundgren, Henning Sten Hansen og John Johansson.  
Vejleder: Torsten Meyer.
- 93/85 "THE SEMIOTICS OF QUANTUM - NON - LOCALITY".  
Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 94/85 "TREENIGHEDEN BOURBAKI - generalen, matematikeren og ånden".  
Projektrapport af: Morten Blomhøj, Klavs Frisdahl og Frank M. Olsen.  
Vejleder: Mogens Niss.
- 95/85 "AN ALTERNATIV DEFENSE PLAN FOR WESTERN EUROPE".  
PEACE RESEARCH SERIES NO. 3  
Af: Bent Sørensen
- 96/85 "ASPEKTER VED KRAFTVARMEFORSYNING".  
Af: Bjarne Lillethorup.  
Vejleder: Bent Sørensen.
- 97/85 "ON THE PHYSICS OF A.C. HOPPING CONDUCTIVITY".  
Af: Jeppe C. Dyre.
- 98/85 "VALGMULIGHEDER I INFORMATIONSDALDEREN".  
Af: Bent Sørensen.
- 99/85 "Der er langt fra Q til R".  
Projektrapport af: Niels Jørgensen og Mikael Klintonp.  
Vejleder: Stig Andur Pedersen.
- 100/85 "TALSISTEMETS OPBYGNING".  
Af: Mogens Niss.
- 101/85 "EXTENDED MOMENTUM THEORY FOR WINDMILLS IN PERTURBATIVE FORM".  
Af: Ganesh Sengupta.
- 102/85 OPSTILLING OG ANALYSE AF MATEMATISKE MODELLER, BELYST VED MODELLER OVER KØRS FODEROPTEGELSE OG - OMSÆTNING".  
Projektrapport af: Lis Eilertzen, Kirsten Habekost, Lill Røn og Susanne Stender.  
Vejleder: Klaus Grünbaum.

- 103/85 "ØDSLE KOLDKRIGERE OG VIDENSKABENS LYSE IDEER".  
 Projekt rapport af: Niels Ole Dam og Kurt Jensen.  
 Vejleder: Bent Sørensen.
- 104/85 "ANALOGREGNEMASKINEN OG LORENZLIGNINGER".  
 Af: Jens Jäger.
- 105/85 "THE FREQUENCY DEPENDENCE OF THE SPECIFIC HEAT OF THE GLASS TRANSITION".  
 Af: Tage Christensen.
- "A SIMPLE MODEL OF AC HOPPING CONDUCTIVITY".  
 Af: Jeppe C. Dyre.  
 Contributions to the Third International Conference on the Structure of Non - Crystalline Materials held in Grenoble July 1985.
- 106/85 "QUANTUM THEORY OF EXTENDED PARTICLES".  
 Af: Bent Sørensen.
- 107/85 "EN MYG GØR INGEN EPIDEMI"  
 - flodblindhed som eksempel på matematisk modellering af et epidemiologisk problem.  
 Projekt rapport af: Per Hedegård Andersen, Lars Boye, Carsten Holst Jensen, Else Marie Pedersen og Erling Møller Pedersen.  
 Vejleder: Jesper Larsen.
- 108/85 "APPLICATIONS AND MODELLING IN THE MATHEMATICS CURRICULUM" - state and trends -  
 Af: Mogens Niss.
- 109/85 "COX I STUDIE TIDEN" - Cox's regressionsmodel anvendt på studenteroplysninger fra RUC.  
 Projekt rapport af: Mikael Wennerberg Johansen, Poul Katler og Torben J. Andreasen.  
 Vejleder: Jørgen Larsen.
- 110/85 "PLANNING FOR SECURITY".  
 Af: Bent Sørensen
- 111/85 "JORDEN RUNDI PÅ FLADE KORT".  
 Projekt rapport af: Birgit Andresen, Beatriz Quinones og Jimmy Staal.  
 Vejleder: Mogens Niss.
- 112/85 "VIDENSKABELIGGØRELSE AF DANSK TEKNOLOGISK INNOVATION FREM TIL 1950 - BELYST VED EKSEMPLER".  
 Projekt rapport af: Erik Odgaard Gade, Hans Hedal, Frank C. Ludvigsen, Annette Post Nielsen og Finn Physant.  
 Vejleder: Claus Bryld og Bent C. Jørgensen.
- 113/85 "DESUSPENSION OF SPLITTING ELLIPTIC SYMBOLS II".  
 Af: Bernhelm Booss og Krzysztof Wojciechowski.
- 114/85 "ANVENDELSE AF GRAFISKE METODER TIL ANALYSE AF KONTINGENSTABELLER".  
 Projekt rapport af: Lone Billmann, Ole R. Jensen og Arne-Lise von Moos.  
 Vejleder: Jørgen Larsen.
- 115/85 "MATEMATIKKENS UDVIKLING OP TIL RENESSANCEN".  
 Af: Mogens Niss.
- 116/85 "A PHENOMENOLOGICAL MODEL FOR THE MEYER-NELDEL RULE".  
 Af: Jeppe C. Dyre.
- 117/85 "KRAFT & FJERNVARMEOPTIMERING"  
 Af: Jacob Mørch Pedersen.  
 Vejleder: Bent Sørensen
- 118/85 "TILFÆLDIGHEDEN OG NØDVENDIGHEDEN IFØLGE PEIRCE OG FYSIKKEN".  
 Af: Peder Voetmann Christiansen
- 120/86 "ET ANIAT STATISTISKE STANDARDMODELLER".  
 Af: Jørgen Larsen
- 121/86 "SIMULATION I KONTINUERT TID".  
 Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 122/86 "ON THE MECHANISM OF GLASS IONIC CONDUCTIVITY".  
 Af: Jeppe C. Dyre.
- 123/86 "GYMNASIEFYSIKKEN OG DEN STORE VERDEN".  
 Fysiklærerforeningen, IMFUFA, RUC.
- 124/86 "ORGAVESAMLING I MATEMATIK".  
 Samtlige opgaver stillet i tiden 1974-jan. 1986.
- 125/86 "UVBY, 8 - systemet - en effektiv fotometrisk spektral-klassifikation af B-, A- og F-stjerner".  
 Projekt rapport af: Birger Lundgren.
- 126/86 "OM UDVIKLINGEN AF DEN SPECIELLE RELATIVITETSTEORI".  
 Projekt rapport af: Lise Odgaard & Linda Szkotak Jensen  
 Vejledere: Karin Beyer & Stig Andur Pedersen.
- 127/86 "GALOIS' BIDRAG TIL UDVIKLINGEN AF DEN ABSTRAKTE ALGEBRA".  
 Projekt rapport af: Pernille Sand, Heine Larsen & Lars Frandsen.  
 Vejleder: Mogens Niss.
- 128/86 "SMÅKRYB" - om ikke-standard analyse.  
 Projekt rapport af: Niels Jørgensen & Mikael Klintonp.  
 Vejleder: Jeppe Dyre.
- 129/86 "PHYSICS IN SOCIETY"  
 Lecture Notes 1983 (1986)  
 Af: Bent Sørensen
- 130/86 "Studies in Wind Power"  
 Af: Bent Sørensen
- 131/86 "FYSIK OG SAMFUND" - Et integreret fysik/historie-projekt om naturanskuelsens historiske udvikling og dens samfundsmæssige betingethed.  
 Projekt rapport af: Jakob Heckscher, Søren Brønd, Andy Wierød.  
 Vejledere: Jens Høyrup, Jørgen Vogelius, Jens Højgaard Jensen.
- 132/86 "FYSIK OG DANNEELSE"  
 Projekt rapport af: Søren Brønd, Andy Wierød.  
 Vejledere: Karin Beyer, Jørgen Vogelius.
- 133/86 "CHERNOBYL ACCIDENT: ASSESSING THE DATA. ENERGY SERIES NO. 15.  
 Af: Bent Sørensen.
- 
- 134/87 "THE D.C. AND THE A.C. ELECTRICAL TRANSPORT IN AsSeTe SYSTEM"  
 Authors: M.B.El-Den, N.B.Olsen, Ib Høst Pedersen, Petr Visčor
- 135/87 "INTUITIONISTISK MATEMATIKS METODER OG ERKENDELSESTEORETISKE FORUDSÆTNINGER"  
 MATEMATIKSPECIALE: Claus Larsen  
 Vejledere: Anton Jensen og Stig Andur Pedersen
- 136/87 "Mystisk og naturlig filosofi: En skitse af kristendommens første og andet møde med græsk filosofi"  
 Projekt rapport af Frank Colding Ludvigsen  
 Vejledere: Historie: Ib Thiersen  
 Fysik: Jens Højgaard Jensen
- 137/87 "HOPMODELLER FOR ELEKTRISK LEDNING I UORDNEDE FASTE STOFFER" - Resume af licentiatafhandling  
 Af: Jeppe Dyre  
 Vejledere: Niels Boye Olsen og Peder Voetmann Christiansen.
- 119/86 "DET ER GANSKE VIST - - EUKLIDS FEMTE POSTULAT KUNNE NOK SKABE RØRE I ANDELTAMMEN".  
 Af: Iben Maj Christiansen  
 Vejleder: Mogens Niss.

138/87 "JOSEPHSON EFFECT AND CIRCLE MAP."

Paper presented at The International  
Workshop on Teaching Nonlinear Phenomena  
at Universities and Schools, "Chaos in  
Education". Balaton, Hungary, 26 April-2 May 1987.

By: Peder Voetmann Christiansen