

Super-GAU und Computersimulation Technisches Nichtwissen in der zivilen Nuklearforschung

Abstract

Dieser Artikel befasst sich mit technischem Nichtwissen in der Nuklearforschung, hier konkret am Beispiel von Reaktorsicherheitsdiskursen um 1970. Mit dem Begriff der *Hypothetizität*, der im Kontext der Schnellbrüter-Forschungsprojekte der BRD in die Debatte um Gefahrenpotenziale bei der Planung, beim Bau und im Betrieb von Kernkraftwerken eingeführt wurde, wird dabei einerseits eine neue epistemische Lage von Wahrheitsgewissheitsverlusten benannt, in der sich Wissen und Nichtwissen wechselweise hervorbringen. Andererseits wird mit diesem Begriff auch gleich die Antwort der Nuklearforscher mitgeführt: Computertechnische Berechnungen und Simulationsprogramme, mit denen ein belastbares Möglichkeitswissen generiert werden sollte.

This article explores dimensions of technical non-knowledge in nuclear research, focusing on the reactor safety discourse around 1970. The concept of *hypotheticality*, which was introduced in the context of West Germany's Fast Breeder Development Programs, characterized a novel epistemic situation where many questions remained utterly intractable by experimentation. However, the concept of hypotheticality, in this context, also encompassed solutions to this epistemic shift: The researchers intended to turn nuclear research into a computational science, where fast computers would provide the means for calculating and simulating both the complex nuclear processes inside the reactors and the risks they could pose for the sociospheres outside of these facilities.

I. Hypothetizität und Nichtwissen

Nur wenige Wochen vor der nuklearen Katastrophe im Atomkraftwerk Fukushima-Daiichi, welche die Regierung der Bundesrepublik Deutschland zu einem Ausstieg aus dem Ausstieg aus dem Kernenergie-Ausstieg bewog, schloss sich in den USA eine andere nukleartechnische Schleife: Im Januar 2011 meldete das Oak Ridge National Laboratory in Tennessee die Förderbewilligung für ein Consortium für Advanced Simulation of Light Water Reactors. Diese Projektgruppe sollte das Computersimulationsprogramm eines ›Virtuellen Reaktors‹ für den örtlichen Cray XT5 Jaguar-Supercomputer entwickeln, einen der damals schnellsten Rechner überhaupt.¹ Zivile Nuklearforschung und High Performance Computing wurden nach langer Zeit wieder in einem Atemzug genannt. Auch in der Bundesrepublik standen die jeweils

1 Vgl. »Die TOP500-Liste der schnellsten Supercomputer«, <http://www.top500.org/featured/top-systems/jaguar-oak-ridge-national-laboratory/> (aufgerufen: 20.2.2016).

leistungsstärksten Großrechner in Garching, Jülich oder Karlsruhe – Orte, die sich bis in die 1980er Jahre noch stolz als Kernforschungszentren betitelten. Doch in den folgenden Jahrzehnten hatten sich diese Hochleistungsrechenzentren weniger kritisch beleumundete Anstriche gegeben: Der Fokus der Big Science² verschob sich diesseits wie jenseits des Atlantiks auf andere rechenintensive Felder wie z.B. Molekularbiologie, Klimaforschung, Astronomie oder Materialwissenschaften. Kernforschung, in den 1960er und 1970er Jahren die Speerspitze der Computational Science, war längst von anderen, nicht weniger komplexen Wissensfeldern abgelöst worden.

Dass die zivile Nuklearforschung in den USA ein derartiges Erweckungserlebnis erfuhr,³ war mit der Aussicht verbunden, auch in diesem Bereich durch *brute force computing* vorher unzugängliche Wissensbereiche zu erschließen. Mithilfe von Rechnern mit Petaflop-Kapazitäten sollte das Programmpaket des ORNL alle Vorgänge in einem kompletten Leichtwasser-Kernkraftwerk modellieren – angefangen bei den atomaren Prozessen im Reaktorkern bis hin zu den Hilfssystemen in irgendeinem Nebengebäude. Somit, so die Hoffnung der Projektmitarbeiter, könnte eine neue Generation von Reaktoren weitgehend ohne kostenintensive Experimente und Versuchsanlagen gebaut, könnten Sicherheitssysteme am Rechner optimiert und könnte die Effizienz des Abbrennverhaltens bestehender Reaktoren verbessert werden. Am Argonne National Laboratory (ANL), einer anderen Großforschungseinrichtung nahe Chicago, arbeitete man gar schon seit 2008 mit einem ähnlich umfassenden Programm auf dem dortigen IBM Blue Gene/P-Supercomputer, um endlich auch die Vorgänge im Kern eines anderen Reaktortyps, des sogenannten ›Schnellen Brutreaktors‹ besser zu verstehen.⁴ Hier wurde eine seit den 1980er Jahren – von wenigen Ausnahmen abgesehen – aus ökonomischen und ingenieurs- wie sicherheitstechnischen Gründen weitgehend ad acta gelegte und somit eigentlich längst vergangene Zukunft des Atomzeitalters wiederbelebt.⁵ Auch am ANL berief man sich auf die qualitativ neuen Möglichkeiten heutiger Simulationsansätze. Sie sollten ohne jene simplifizierenden Annahmen und künstlich eingeführten Parameter aus-

2 Vgl. Bruce Hevly und Peter Galison (Hg.): *Big Science: The Growth of Large-Scale Research*, Stanford 1992.

3 Barack Obama erwähnte das ORNL-Projekt z.B. in seiner Rede zur Lage der Nation 2011; vgl. John Huotari: »President's Speech Names Names: ORNL«, in: *The Oak Ridger*, 27.2.2011.

4 Vgl. Argonne National Laboratory (Hg.): »Computer Simulations help design new Nuclear Reactors«, in: *Argonne Now*, Spring 2008, http://www.ne.anl.gov/About/headlines/new_nuclear_a_ge.shtml (aufgerufen: 20.2.2016).

5 Ausnahmen: Zwar wurden einige Brüterprojekte bis in die 1990er Jahre (der französische Brüter mit dem sprechenden Namen Super-Phénix und russische Reaktoren) oder gar bis heute (Monju in Japan, allerdings war dieser wegen technischer Probleme und Sicherheitsbedenken kaum in Betrieb) fortgeführt. In Indien und China wurden sogar Forschungsprogramme neu aufgelegt, doch auch hier hat man stetig mit technischen Problemen zu kämpfen. Bisher wurde kein Brüter-Projekt zu einem jener Leistungsreaktoren weiterentwickelt, auf die man in den 1970er Jahren eigentlich bereits hinarbeitete.

kommen, die frühere Software erst ausführbar gemacht hatten. Der am Forschungsprojekt des Argonne beteiligte Programmierer Andrew Siegel fasst dies so:

»Now, petascale computing allows us to create models that can explicitly represent a reactor's geometry. For the first time, we can resolve a great deal of the detail of what's happening in a reactor core – it's a true paradigm shift.«⁶

Die beiden Nuklearforschungsprojekte beanspruchen die Neubewertung einer verfangenen epistemologischen Lage, die sich im Rahmen der sogenannten zweiten Phase des zivilen Reaktorbaus in den 1960er und 1970er Jahren herauskristallisiert hatte.⁷ Was heute angeblich in simulationstechnische Reichweite gelangt, nämlich ein integratives Verständnis der mannigfachen physikalischen Prozesse in einem Reaktorkern, war in dieser Hochphase der Kernkrafteuphorie ein weitgehend unkartiertes Feld. Einerseits ließen sich die komplexen Vorgänge und Wechselwirkungen innerhalb einer Reaktoranlage analytisch nicht mehr vollständig beschreiben. Andererseits konnten nur für Teilprobleme noch aussagekräftige Experimente durchgeführt werden. Viele reaktive Prozesse waren schlicht zu gefährlich, um sie noch in jener gewohnten ingenieurtechnischen Weise zu erforschen, die auf einem Wechselspiel von Hypothesenbildung und anschließender experimenteller Validierung oder Widerlegung beruhte, oder kurz: auf Versuch und Irrtum.

Dieser Beitrag untersucht anhand des Themas Reaktorsicherheit, wie in der Hochphase der Entwicklung und Konstruktion Schneller Brutreaktoren hypothetisches Wissen problematisiert und wie mit ihm umgegangen wurde – oder kurz: wie schon Jahrzehnte vor dem angesprochenen angeblichen computersimulatorischen Paradigmenwechsel rechnergestützte Ansätze die Nuklearforschung zu einer Computational Science machten. Kernkraftkritiker wie Günther Anders und Robert Jungk hatten seinerzeit lautstark darauf hingewiesen, dass in der Atomforschung der Testfall immer auch schon der Ernstfall sei.⁸ Nuklearforschung erforderte neue Konzepte, um ein nicht mehr experimentell adressierbares Nichtwissen zu operationalisieren und auf ein annehmbares Maß zu reduzieren – indem sie mit innovativen Techniken ein verlässliches Möglichkeitswissen entwarf. Der Physiker Wolf Häfele, Chefentwickler und -advokat der westdeutschen Schnellbrüterprojekte, brachte dies in einem erstmals 1974 in der Zeitschrift *Minerva* erschienen Artikel auf einen Begriff. Für Häfele, einen der »Hohepriester der deutschen Atomgemeinde« (Jungk), waren zwar Kernkraftwerke nichts weniger als die Kathedralen der Moderne. Seine

6 Argonne National Laboratory (Hg.): »Computer simulations help design new nuclear reactors«, in: *Argonne Now*, Spring 2008, http://www.ne.anl.gov/About/headlines/new_nuclear_age.shtml (aufgerufen: 20.2.2016).

7 Vgl. Wolf Häfele: »On the Development of Fast Breeders«, in: *Kernforschungszentrum Karlsruhe Research Paper KFK-881*, November 1968.

8 Vgl. Günther Anders: *Die atomare Drohung. Radikale Überlegungen zum atomaren Zeitalter*, München 2003; vgl. Robert Jungk: *Der Atom-Staat. Vom Fortschritt in die Unmenschlichkeit*, Reinbek 1986.

Forschergruppen huldigten jedoch zugleich einer geradezu ›nachmodernen‹ Bestimmung von Wissenschaft.⁹ Sie verstanden sich als wissenschaftliche Avantgarde, gerade weil sie in hohem Maße mit nicht mehr abschließbaren Bereichen des Nichtwissens konfrontiert waren. Diese Domäne galt es mit ganz unterschiedlichen und komplementären Methoden und Techniken epistemisch zu sichern. Häfele bezeichnete diese neue epistemische Lage als *Hypotheticality*, als Hypothesizität:

»Hypotheticality, of course, is not a word in the regular usage but its logic expresses precisely what must be expressed in the line of reasoning presented here. Its logic is the same as that of the word ›criticality‹, for example, a term which is familiar to reactor engineers. [...] [A] reactor can become critical or a situation can be considered as hypothetical. The process of iteration between theory and experiment which leads to truth in its traditional sense is no longer possible. Such truth can no longer be fully experienced. This means that arguments in the hypothetical domain necessarily and ultimately remain inconclusive.«¹⁰

Hypothesizität geht bei Häfele über historisch ältere Konnotationen hinaus, auf deren Basis etwa der Wissenschaftsphilosoph Gregor Schiemann den Begriff als geradezu kennzeichnend für ein modernes Wissenschaftsverständnis beschreibt. Gemäß neuerer Ansätze in der Wissenschaftsphilosophie und historisch aufgehängt an einem von Hermann von Helmholtz vorbereiteten »Prozess der Wahrheitsrelativierung«,¹¹ sähen sich Schiemann zufolge wissenschaftliche Theorien einer mindestens vierfachen Prekarisierung ausgesetzt: Gerahmt von der – ganz foucault'schen – Frage nach der Abhängigkeit des Wissens von sich historisch transformierenden kulturellen Formationen seien wissenschaftliche Theorien *hypothetisch* in dreierlei Hinsicht:

»in Bezug auf die in ihnen formulierten Gesetzesaussagen, in Bezug auf die untrennbar mit Erfahrung verbundene logisch-mathematische Struktur und in Bezug auf die relativierende sprachliche Verfärbung der empirischen Geltungsbasis. Wollte man der Wissenschaft ein ›oberstes Prinzip‹ geben, so müßte es nicht Wahrheitssuche, sondern Hypothesizität heißen.«¹²

Anstelle eines Einheitsbestrebens im Sinne einer universellen Wahrheit hinter den mannigfachen Phänomenen der Welt werde das akzeptierte Nebeneinander mannigfacher Theorien zum Kennzeichen eines solchen Wissenschaftsverständnisses. Und

-
- 9 Vgl. Jan C. Schmidt: *Instabilität in Natur und Wissenschaft. Eine Wissenschaftsphilosophie der nachmodernen Physik*, Berlin 2007.
- 10 Wolf Häfele: »Hypotheticality and the New Challenges«, in: John Francis und Paul Albrecht (Hg.): *Facing up to Nuclear Power*, Edinburgh 1976, S. 40–68, hier: S. 55.
- 11 Gregor Schiemann: *Wahrheitsgewissheitsverlust. Hermann von Helmholtz' Mechanismus im Anbruch der Moderne. Eine Studie zum Übergang von klassischer zu moderner Naturphilosophie*, Darmstadt 1997, S. 375.
- 12 Gregor Schiemann: »Wider den Revitalisierungsversuch eines Wahrheitsmythos«, in: *Ethik und Sozialwissenschaften* 5/3 (1994), S. 467–469, hier S. 468.

damit ist zugleich jenes Schisma von Philosophie und Naturwissenschaften berührt, dass sich besonders prominent in Edmund Husserls Auseinandersetzung mit Helmholtz niederschlägt.¹³

Über eine solche allgemeine, wissenschaftstheoretische Seite von Hypothetizität hinaus spricht Häfeles Text jedoch zugleich konkret Technologien an, mit deren Hilfe sich die hypothetische Domäne am geeignetsten explorieren lasse. Dies seien »comprehensive computer codes for the largest computers available«.¹⁴ Computerbasierte Berechnungen und Simulationsmodelle sind für Häfele die Medien der Wahl, um zu bewerkstelligen, was Charles Perrow einmal als die Quintessenz eines hypothetischen Wissens im Bereich der Hochtechnologie kennzeichnete: prinzipiell nicht ausschließbare Katastrophen zu normalisieren.¹⁵ Eine solche Reduzierung von Risiken auf ein annehmbares Maß ist in doppeltem Wortsinne zu verstehen: Die Zusammenhänge und Prozesse in den nuklearen Anlagen mussten sowohl aus epistemischer Perspektive auf wissenschaftlich belastbare *Annahmen* rekurrieren und in ihrer Dynamik durchgespielt werden als auch in einer Weise abgesichert sein, die ihr Möglichkeitswissen zugleich für eine breite Öffentlichkeit *annehmbar* machte. Mit Ulrich Beck gesprochen, musste dieses hypothetische Wissen sowohl einer wissenschaftlichen wie auch einer sozialen Rationalität genügen.¹⁶

Wenn Hypothetizität in der zivilen Kernforschung um 1970 also immer schon zusammengedacht wird mit computertechnischen Explorationsverfahren, lässt sich die Frage nach technischem Nichtwissen in mehrfacher Hinsicht exemplarisch situieren: Für die Nuklearforscher ist Nichtwissen keinesfalls bloß die undefinierte und unmarkierte Rückseite des Wissens – wobei ja stets zu fragen wäre, wie denn überhaupt die Vorderseite, also der Bereich des Wissens selbst festzustellen wäre.¹⁷ Vielmehr spielen hier vor allem vier Aspekte von Nichtwissen eine Rolle, die an verschiedenen Stellen formuliert wurden. Zunächst und *erstens* ist Nichtwissen als Gegenstand der Untersuchung im Kontext der Reaktorsicherheit nicht unmittelbar zugänglich. Es setzt »sowohl einen (Selbst-)Beobachter als auch ein wie immer selektives oder hypothetisches Wissen oder zumindest Vermuten und Befürchten des Nichtwissens

13 Vgl. ebd., S. 468.

14 Häfele: »Hypotheticality and the New Challenges«, in: Francis (Hg.): *Facing up to Nuclear Power*, a.a.O. S. 57–58.

15 Zum Begriff des Störfalls vgl. z.B. Charles Perrow: *Normale Katastrophen. Die Unvermeidbaren Risiken der Großtechnik*, Frankfurt/M. 1989; vgl. Lars Koch und Christer Petersen: »Störfall – Fluchtlinien einer Wissensfigur«, in: Dies. und Joseph Vogl (Hg.): *Störfälle. Zeitschrift für Kulturwissenschaften* 2 (2011), S. 7–12; vgl. Eva Horn: »Die Zukunft der Dinge. Imaginationen von Unfall und Sicherheit«, in: *Behemoth. A Journal on Civilisation* 4/2 (2011), S. 26–57.

16 Vgl. Ulrich Beck: *Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne*, Frankfurt/M. 1986, S. 38–40.

17 Vgl. hierzu überblicksmäßig Peter Wehling: »Jenseits des Wissens? Wissenschaftliches Nichtwissen aus soziologischer Perspektive«, in: *Zeitschrift für Soziologie* 30/6 (2001), S. 465–484.

voraus«. ¹⁸ Solche Befürchtungen waren geradezu die Triebfeder der Schnellbrüter-Sicherheitsdiskurse um 1970. Zudem entwickelte die Nuklearforschung – der Geburtsort der Big Science schlechthin und angetrieben von gewaltigen Fördersummen – *zweitens* einen eigenen ›Denkstil‹ im Sinne Ludwik Flecks mit spezifischen Scheuklappen und Machbarkeitsphantasien. Erkenntnisprozesse und technische Innovationen im Kontext der Reaktorsicherheit erzeugten oft wiederum je neue Bereiche des Nichtwissens, woraufhin sie z.B. von komplementären Maßnahmen flankiert wurden, die wiederum blinde Flecken mit sich brachten, und so weiter. Wissen und Nichtwissen bedingten sich in diesen Entwicklungen gegenseitig und brachten sich wechselweise hervor. ¹⁹ Daran anschließend bestimmt sich Nichtwissen hier *drittens* von der Komplexität der Erkenntnisgegenstände her, in der kaum mehr sichere Trennlinien zwischen Wissen und Nichtwissen gezogen werden können:

»Bemühungen um mehr Wissen können an der Überkomplexität der Problemlagen scheitern, vermeintliches Wissen erweist sich als Nichtwissen – aber es ist auch nicht prinzipiell auszuschließen, dass [...] Nichtwissen zumindest teilweise in ›handhabbares‹ Wissen überführt werden kann.« ²⁰

Und schließlich stellt sich *viertens* im Anschluss an die politisch-gesellschaftliche Dimension von Reaktorsicherheit mit Ulrich Beck die Frage nach einer Relativität des Nichtwissens: Anstatt einer linearen Steigerung von Wissen und fortschreitenden Umwandlung von Nicht-Wissen in Wissen das Wort zu reden, gehe es darum, gesellschaftlich ausgehandelte Kombinationen von Wissen und Nichtwissen zu beschreiben: »Wer weiß was warum und warum nicht? Wie werden Wissen und Nichtwissen konstruiert, anerkannt, in Frage gestellt, geleugnet, behauptet, ausgegrenzt?« ²¹ Das kernforscherische Spannungsfeld von ›computergestützter Hypothesizität‹ und technischem Nichtwissen um 1970, so möchte dieser Artikel zeigen, gibt dabei auch Aufschluss über jene je fallweise und historisch wechselnde Unterscheidung von Risiko, Ungewissheit des Wissens und Nichtwissen, die hier weniger als klar abgeschlossene Kategorien, sondern vielmehr als computertechnisch miteinander verknüpfbare und ineinander verzahnte Bereiche erkannt werden. Die sich hier konkretisierenden Parametrisierungen von Unsicherheiten und computertechnischen Hegungsversuche von Zukunftsunsicherheiten zielen zugleich ins Zentrum der Computersimulationsforschung. Ganz ähnliche Grundprobleme wurden prominent etwa

18 Ebd., S. 469, angelehnt an Deena Weinstein und Michael A. Weinstein: »The Sociology of Nonknowledge: A Paradigm«, in: Robert A. Jones (Hg.): *Research in the Sociology of Knowledge, Sciences and Art*, Bd. 1, New York 1978, S. 151–166, hier S. 153.

19 Vgl. Ludwik Fleck: *Entstehung Und Entwicklung Einer Wissenschaftlichen Tatsache: Einführung in Die Lehre Vom Denkstil Und Denkkollektiv*. Basel 1935.

20 Wehling: »Jenseits des Wissens?«, in: *Zeitschrift für Soziologie*, a.a.O., S. 474.

21 Ulrich Beck: »Wissen oder Nicht-Wissen? Zwei Perspektiven ›reflexiver Modernisierung‹«, in: Ders., Anthony Giddens und Scott Lash: *Reflexive Modernisierung. Eine Kontroverse*, Frankfurt/M. 1996, S. 289–315, hier S. 289.

im Kontext der Ökosystem- und der Klimaforschung, der Synthetischen Biologie oder auch der Simulation sozialer Systeme thematisiert.²²

Der Begriff der Hypothetizität beinhaltet dabei einerseits eine analytische Dimension, die einen Umgang mit wissenschaftlichen »Wahrheitsgewissheitsverlusten«²³ kennzeichnet. Hinzu kommt eine historische Dimension, die sich anhand von verschiedenen funktionalen Verwendungen des Begriffs innerhalb der Geschichte der zivilen Kernforschung selbst festmachen lässt. Drittens umfasst er eine technische Dimension, die sich in der Ausbildung von Verfahren der computergestützten Berechnung und Simulation komplexer Zusammenhänge niederschlägt. Und viertens enthält er eine politische Dimension, indem er auch die Übergänge von Technosphäre und Soziosphäre im Hinblick auf die außerordentlichen Gefährdungspotenziale der Nukleartechnik perspektiviert.²⁴

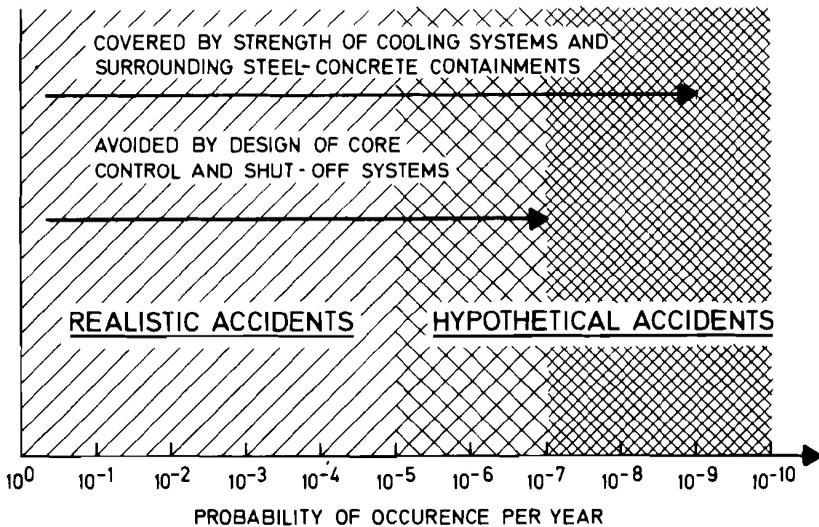


Abb. 1: Matrix möglicher Unfälle zwischen realistischen und hypothetischen Szenarien und Typen von Sicherheitsmaßnahmen

- 22 Vgl. z.B. Gabriele Gramelsberger und Johann Feichter (Hg.): *Climate Change and Policy. The Calculability of Climate Change and the Challenge of Uncertainty*, Heidelberg/Berlin/New York 2011; vgl. Gabriele Gramelsberger: »The Simulation Approach in Synthetic Biology«, in: *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 44/2 (2013), S. 150–157; vgl. Corinna Elsenbroich: »Explanation in Agent-Based Modelling: Functions, Causality or Mechanisms«, in: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 15/3 (2012), <http://ja.sss.soc.surrey.ac.uk/15/3/1.html> (aufgerufen: 31.5.2016).
- 23 Ulrich Beck: »Wissen oder Nicht-Wissen?«, in: Ders.: *Reflexive Modernisierung*, a.a.O., S. 289.
- 24 Vgl. J. H. Milsum: »The Technosphere, the Biosphere, the Sociosphere. Their Systems Modeling and Optimization«, in: *IEEE Spectrum* 5/6 (1968), S. 76–82.

Im Folgenden wird der Beitrag den Verbindungen zwischen dieser spezifischen Hypothetizität und der Frage nach der Bestimmung von technischem Nichtwissen im Kontext der Schnellbrüter-Sicherheitsforschungen um 1970 anhand dieser vier Dimensionen nachspüren. Dabei sollen drei Ebenen der ›Vermöglichung‹ von Wissen in den Blick kommen: Dies ist *erstens* die Ebene eines grundlegend veränderten Status von Theoriebildung und Experiment. Der Abgleich von Hypothesen und diese stützenden oder negierenden Versuchen ist aufgrund der hochgefährlichen radioaktiven Prozesse kaum mehr möglich. Eine sukzessive Annäherung an mögliche Lösungen per Trial-and-Error kann daher nur mehr in einer technischen Übertragung der zu behandelnden Probleme auf Rechenmodelle und Computersimulationen erfolgen.²⁵ Die *zweite* Ebene betrifft die Validität der verwendeten Daten: Wegen der oft simplifizierenden Simulationen, aber auch wegen der empirisch meist schwer zu messenden Effekte experimenteller Tests ist der Status sowohl von Input- wie Output-Daten höchst prekär. Sie müssen in ihrer ›Gemachtheit‹ eher im Sinne von Bruno Latours Begriff des ›Faktums‹ verstanden werden.²⁶ Diese Ebenen werden über die ersten beiden Abschnitte des Beitrags hinweg verhandelt. Eine *dritte* Ebene schließlich spricht den Zusammenhang von wissenschaftlicher und sozialer Rationalität an: Wenn sich gewisse Gefahren technisch nicht vollkommen beherrschen lassen, muss man sie durch andere – in diesem Fall probabilistische – Verfahren hegen: Etwa indem sie zu ›Restrisiken‹ kleingerechnet werden, indem juristische Risikokategorien definiert werden – etwa jene des ›Größten anzunehmenden Unfalls‹ (GAU) oder des Super-GAU –, oder indem die Risiken der Kernenergie offensiv mit denen anderer Technologien verglichen werden. Diesem Aspekt widmet sich der dritte Abschnitt. Entlang von *Fast Reactor Safety*-Techniken schärft sich dabei nicht nur der Begriff der Hypothetizität (Abb.1), sondern relativieren sich auch Erfolgsmeldungen über paradigmatische Erkenntnisfortschritte in heutigen Reaktorsimulationssystemen.

II. Hypothetische Kernzerlegungsstörfälle

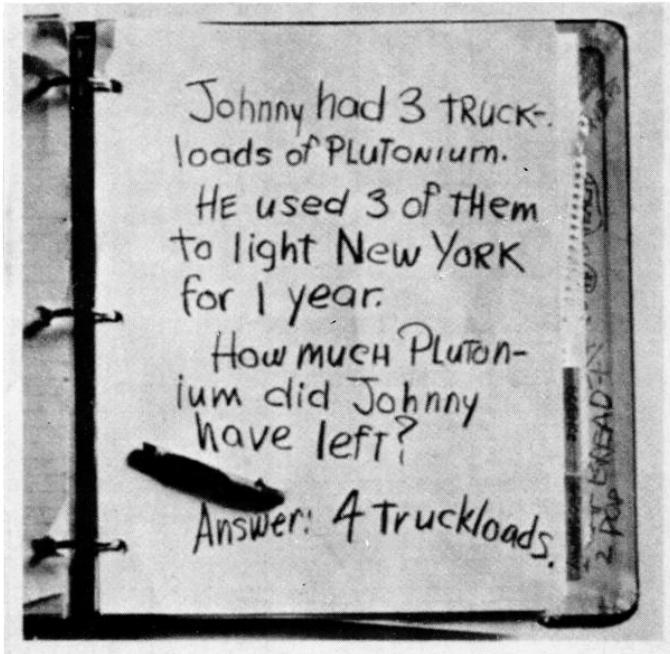
Wie ernst das Thema Sicherheit im Zusammenhang mit Schnellen Brutreaktoren genommen wurde, lässt allein schon die Masse der entsprechenden, heute meist in Bibliotheks-Außenmagazinen verschwundenen, ausnahmslos seitenstarken Literatur

25 Vgl. Sebastian Vehlken: Zootechnologien. Eine Mediengeschichte der Schwarmforschung, Berlin 2012, S. 301–308; vgl. allgemein: Hans-Jörg Rheinberger: Experimentalsysteme und epistemische Dinge. Eine Geschichte der Proteinsynthese im Reagenzglas, Frankfurt/M. 2001.

26 Vgl. Bruno Latour: »Der Pedologen-Faden von Boa Vista. Eine photo-philosophische Montage«, in: Ders.: *Der Berliner Schlüssel. Erkundungen eines Liebhabers der Wissenschaften*, Berlin 1996, S. 191–248.

erkennen.²⁷ Man mag sich dem Kommentar eines zeitgenössischen Rezensenten anschließen, der vor dem schieren Umfang schon des ersten Bandes einer von ihm besprochenen Sammlung *The Technology of Nuclear Reactor Safety* verzweifelt: »[A] review of such a book by a single reviewer can at best be inadequate. The impulse to tell some funny stories and go home was thwarted by the fact that none seem to have been invented about reactor dynamics or the Doppler coefficient, not even any unsuitable for publication.«²⁸ Während der Autor humoristisch noch Opfer eines Zeitgeists ironiefreier Atomkrafteuphorie ist, könnte man heute tatsächlich viele ›funny stories‹ erzählen – wenn einem das Lachen nicht meist direkt wieder im Halse stecken bliebe: So wirkt etwa die Illustration eines Schülerechnenheftes (Abb. 2), die 1974 in einer PR-Broschüre noch die öffentliche Akzeptanz des US-Brüterprogramms steigern sollte, heute wie eine prototypische Milchmädchenrechnung.²⁹ Doch das Ergebnis der vermeintlichen Schülerkritzelei – die Produktion von mehr spaltbarem Material als im Brutprozess verbraucht wurde – führt ins Zentrum der Faszination für die Technologie des Schnellen Brüters:³⁰ Das ›Erbrüten‹ (breeding) neuer radioaktiver Substanzen beim ›Verbrennen‹ (burning) radioaktiver Stoffe war bereits im Kontext von Enrico Fermis und Walter H. Zinns Arbeiten am *Chicago Pile-1*, jenem unter einer alten Sporttribüne auf dem Campus der University of Chicago gebauten ersten Reaktor, beschrieben worden.³¹ In Zeiten prognostizierter Ressourcenverknappung, auch im Fall von Uran, wurden Brüter damit einerseits zur Schlüsseltechnologie eines mittelfristig in Aussicht gestellten, friedlichen Atomzeit-

-
- 27 Vgl. z.B. Theos J. Thompson und James G. Beckerley (Hg.): *The Technology of Nuclear Reactor Safety*, Cambridge 1965; vgl. John Graham: *Fast Reactor Safety*, New York u.a. 1971; vgl. Alan E. Waltar und Albert B. Reynolds: *Fast Breeder Reactors*, New York 1981; vgl. David Okrent: *Nuclear Reactor Safety. On the History of the Regulatory Process*, Madison 1981; vgl. Frank R. Farmer (Hg.): *Nuclear Reactor Safety*, New York u.a. 1977; vgl. John G. Yevick und Alfred Amorosi (Hg.): *Fast Reactor Technology*, Cambridge, London 1966; vgl. American Nuclear Society (Hg.): *Proceedings of the Fast Reactor Safety Meeting*, Beverly Hills, 2.–4.4.1974; vgl. International Atomic Energy Agency (Hg.): *Principles and Standards of Reactor Safety*, Wien 1973; vgl. International Atomic Energy Agency (Hg.): *Fast Breeder Reactors: Experience and Trends*, 2 Bde., Wien 1986.
- 28 Paul F. Gast: »The Essence of Safety«, in: *Nuclear Applications 1* (1965), S. 493.
- 29 Dean A. Abrahamson: »Debunking the Breeder«, in: *Bulletin of the Atomic Scientist* 30 (1974), Heft 10, S. 44.
- 30 Es muss erwähnt werden, dass mit der Plutoniumproduktion verbundene Probleme wie Proliferation oder seine hochgradige Gesundheitsgefährdung bald kontrovers diskutiert wurden. Vgl. z.B. Victor Gilinsky: *Breeder Reactors and the Spread of Plutonium (RAND Research Paper P-3483)*, Santa Monica 1966; vgl. Günter Altner und Inge Schmidt-Feuerhake: »Die Gefahren der Plutoniumwirtschaft: Der ›Schnelle Brüter‹: Die nächste Auseinandersetzung in der Energiediskussion. Ein Memorandum kritischer Wissenschaftler und Publizisten«, Frankfurt/M. 1980; vgl. Klaus Meyer-Abich und Reinhard Ueberhorst (Hg.): *AUSgebrütet – Argumente zur Brutreaktorpolitik*, Basel 1985.
- 31 Vgl. Yevick (Hg.): *Fast Reactor Technology*, a.a.O., S. 3.



The new math. Illustration on the cover of a pamphlet distributed by the U.S. Atomic Energy Commission to promote public acceptance of the breeder reactor.

Abb. 2: »The New Math« im Brüterzeitalter: Ressourcenerzeugung statt Ressourcenverbrauch

alters und seines »Fuel Circles«. ³² Doch diese »moderne Alchemie« ³³ ist andererseits physikalisch sehr viel schwieriger zu kontrollieren als die Vorgänge in konventionellen Kernkraftwerken. Schon die ersten US-amerikanischen, experimentellen Brutreaktor-Projekte EBR-I und EBR-II sensibilisierten die beteiligten Forscher für die Gefahr der sogenannten *prompten Kritikalität* und der Notwendigkeit hocheffizienter Kühlsysteme.

Prompte Kritikalität bezeichnet die Gefahr, dass die im Vergleich zu thermischen Reaktoren sehr viel kürzeren Generationszeiten der schnellen Neutronen zu nicht mehr steuerbaren Neutronenvermehrungen und damit unkontrollierten Spaltprozessen führen können. Zwar wurden Brutreaktoren von Beginn an mit zusätzlichen

32 Reinhard Breuer: »Rettung durch den Schnellen Brüter?«, in: Holger Strohm (Hg.): *Schnelle Brüter und Wiederaufbereitungsanlagen*, Hamburg 1977, S. 25–39, hier S. 25.

33 Charles R. Bell, »Breeder Reactor Safety – Modeling the Impossible«, in: *Los Alamos Science* 3 (1981), S. 98–117.

Steuerstäben ausgestattet, die im Störfall in den Reaktor hineingeschossen werden sollten (die sogenannte SCRAM-Technologie),³⁴ doch bei Multiplikationszeiten von weniger als einer Millionstel Sekunde war deren regulative Wirksamkeit zumindest fraglich. Eine sogenannte »Leistungsexkursion«, ein »Durchgehen« des Reaktors, war somit prinzipiell möglich.³⁵ Zudem ist die Kühleffizienz essentiell wegen des in Brüttern sehr viel kompakter konstruierten und hochgradig mit Plutonium angereicherten Kerns (Abb. 3), dessen Hitze sehr schnell abgeleitet werden muss.

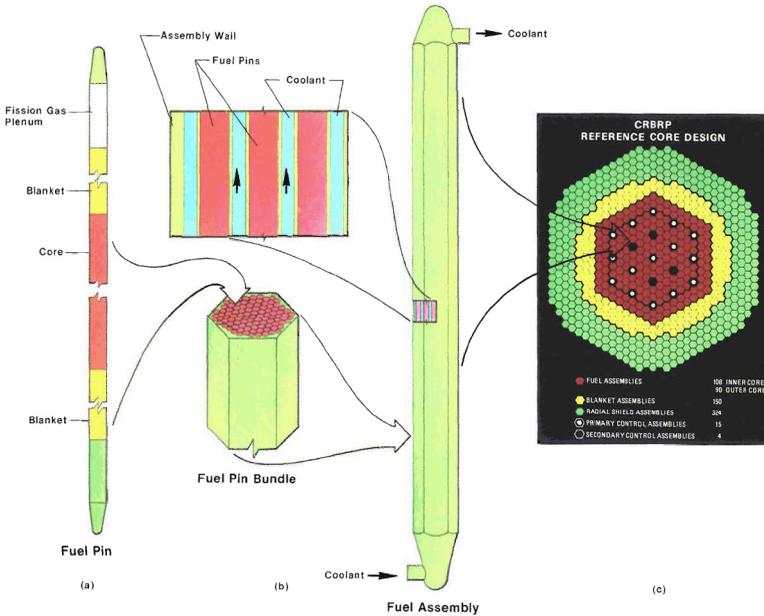


Abb. 3: Längs- und Querschnitte durch Brennelement- und Kernzusammensetzung eines Schnellbrüters

Bei einem Aussetzen der Kühlung oder der Kondensation des Kühlmittels bestand die Gefahr, dass sich die Brennelemente unkontrolliert erhitzen und eine Kernschmelze einsetzt. Das bei thermischen Reaktoren verwendete Wasser fiel wegen seiner moderierenden Eigenschaften aus, da es Neutronen bremst und absorbiert, sodass in den meisten Brüterprojekten auf flüssiges Natrium zurückgegriffen wurde – daher auch die Bezeichnung *Liquid Metal Fast Breeder Reactor* oder kurz LMFBR.

34 Vgl. z.B. Clyde C. Scott: »Plant Instrumentation and Control«, in: Yevick (Hg.): *Fast Reactor Technology*, a.a.O., S. 579–652, hier S. 600–630.

35 Klaus Meyer-Abich und Hariolf Grupp: »Die risikoanalytische Bewertung des Brütters«, in: Meyer-Abich (Hg.): *AUSgebrütet*, a.a.O., S. 108–140, hier S. 118.

Und anders als normale Reaktoren werden Brüter nicht mit ihrem Reaktivitätsmaximum betrieben. Ihre Reaktivität sinkt beim Verdampfen des Kühlmittels nicht automatisch – eine durch Hitzeentwicklung induzierte Neuordnung und Kompression des Spaltmaterials konnte vielmehr zu heftigen ›Exkursionen‹ führen. Den Physikern Walter Zinn und Hans Bethe, die als Berater an den EBR-Projekten mitwirkten, war diese Möglichkeit sehr bewusst:

»Zinn and Bethe agreed about what would happen if the central section of the reactor core were to melt and run down the tubes, and both made it clear that this could be a disastrous event. If the fuel rods melted or warped, no one could predict what kind of configuration might result. If it were compact, Zinn felt, it could ›disassemble the machine.‹ In plain language, this meant a nuclear explosion.«³⁶

Allein schon die physikalischen Gegebenheiten innerhalb eines schnellen Brüters machten also die Berücksichtigung derartiger Gefahren notwendig. Als am 29. November 1955 der EBR-I im Zuge eines Experiments tatsächlich prompt kritisch wurde und es zu einer partiellen Kernschmelze kam, verdeutlichte dies die Dringlichkeit der Sicherheitsfrage von LMFBRs nur noch mehr. Daher stellte Bethe 1956 gemeinsam mit einem Mitarbeiter eine Modellrechnung für eine Leistungsexkursion mit prompter Überkritikalität auf, den sogenannten Bethe-Tait-Störfall.³⁷ Bethe und Tait beschrieben darin die mutmaßliche Größe einer Explosion, welche die erhöhte Reaktivität eines unter Gravitation in sich zusammenfallenden Urankerns nach sich zieht, bei gleichzeitigem Ausfall aller Kühl- und Schnellabschaltsysteme. Hierbei sind Faktoren wie die Hydrodynamik der Kühlflüssigkeit, das thermische Verhalten der involvierten Materialien und natürlich die nuklearen Prozesse der Spaltmaterialien in ihrem Zusammenspiel zu kalkulieren.

Dieser modellhafte Störfall war ein hypothetisches Ereignis in zweierlei Hinsicht: Er basierte auf »a number of pessimistic simplifying assumptions«³⁸ und sollte damit, so betonten die Autoren, als Markierung eines maximalen Grenzwertes für eine mögliche Explosion eines Brüter-Kerns dienen. Keinesfalls hingegen sollte er die »probability of the occurrence of the above sequence of events« hervorkehren.³⁹ Trotz seiner recht groben Schätzungen wird der Bethe-Tait-Störfall damit in epistemologischer Hinsicht zur Blaupause einer Kategorie der Reaktor-Sicherheitstechnik, die sich Hypothetischer Kernzerlegungsstörfall, oder englisch *Hypothetical Core Disruptive Accident*, kurz HCDA, nennt. Diese Störfallkategorie, die standardmäßig in die entsprechenden Handbücher und Sicherheitskonferenz-Proceedings einfließt, und die als *Maximal Credible Accident* (MCA) oder *Größter Anzunehmender Unfall*

36 John G. Fuller: *We almost lost Detroit*, New York 1975, S. 24.

37 Hans A. Bethe und J. H. Tait: »An Estimate of the Order of Magnitude of the Vigorous Interaction Expected Should the Core of a Fast Reactor Collapsex«, in: *UKAEA RHM* 56/113 (1956).

38 Ebd., S. i.

39 Ebd., S. i.

(GAU) auch als Benchmark für juristische Brüter-Lizenzierungsverfahren dient, wird unter der Maxime eines eingeschlossenen Ausschlusses beschrieben:

»Da bei einem Bethe-Tait-Störfall zumindest der Reaktor unbrauchbar würde und auch die Gefahr einer Radioaktivitätsfreisetzung besteht, sind gegen das Eintreten dieses Störfalls viele konstruktive Maßnahmen getroffen worden. Er ist damit nicht unmöglich geworden, aber seine Eintrittswahrscheinlichkeit ist vermutlich gering.«⁴⁰

Diese Störfallkategorie wird auch *Auslegungsstörfall* genannt: Das Kraftwerk musste so konstruiert werden, dass es diesem Störfall widerstehen würde. Zu diesen Maßnahmen gehören etwa hochsensible Sensoren zur Detektion von Temperaturschwankungen, aktive Sicherungen der Kühlsysteme oder avancierte SCRAM-Technologien.⁴¹ Derartige Störfälle sollten mithin von vorneherein immer im Bereich der Hypothetizität bleiben – sie werden nur angenommen, um möglichst unwahrscheinlich gemacht werden zu können. Daher werden sie auch als *Bounding Accidents* bezeichnet. Über ihre Sinnhaftigkeit wird intensiv diskutiert. So notiert etwa Robert Avery, ein Reaktorsicherheitsexperte vom Argonne National Laboratory 1974:

»It is a sometimes stated viewpoint that too much attention is given to the maximum worst but highly improbable event and not enough to smaller more probable accidents. While there may be much truth to this, I believe we are correctly largely preoccupied with the bounding accident. [...] Questions related to the bounding accident may have profound effects on some aspects of the reactor plant design. [...] Even if the position taken with any given reactor is that any event releasing large amounts of activity is sufficiently unlikely to not require any effect on design we still have to answer the ›what if‹ line of questions [...]. About the worst answer that can be given in fast reactor safety research is that we have not looked at the problem in question.«⁴²

Dementgegen formuliert eine Greenpeace-Studie noch 1994: »CDAs are sometimes called Hypothetical (or unthinkable) core disruptive accidents. This is usually done by those not wishing that such accidents are credible and could happen.«⁴³ Tatsächlich hielten weite Teile der Forschergemeinde solche Störfälle für so gut wie unmöglich – dennoch wurde an Modi eines besseren Durchdenkens des ›undenkbaren‹ Störfalls gearbeitet, als es die simplifizierende Bounding-Methode des Bethe-Tait-Tests darstellte.

40 Benecke: »Die kompromittierte Wissenschaft. Erfahrungen bei Risikoanalysen«, in: Meyer-Abich (Hg.): *AUSgebrütet*, a.a.O., S. 259–279, hier S. 264.

41 Vgl. überblickshaft Waltar: *Fast Breeder Reactors*, a.a.O.

42 Robert Avery: »Fast Reactor Safety Research Needs – What, Why, How and When?«, in: American Nuclear Society (Hg.): *Proceedings of the Fast Reactor Safety Meeting*, Beverly Hills, 2.–4.4.1974, S. 379–384, hier S. 380.

43 Frank Barnaby und Shaun Burnie: »The Safety of Fast Breeder Reactors: The New Threat of Monju. Summary of the Report on the Safety of the Monju Breeder Reactor«, Tokio, 24.3.1994, http://www.srswatch.org/uploads/2/7/5/8/27584045/monju_report_1994.pdf (aufgerufen: 20.2.2016).

Der dahinterstehende Impetus erinnert an das Anfang der 1960er Jahre durch den »One-Man Think Tank« Herman Kahn geprägte Diktum des *Thinking About the Unthinkable*.⁴⁴ Das Denken des Udenkbaren implizierte bei Kahn stets eine Pluralität von hypothetischen Narrativen für die Initiation, den Ablauf und die Beendigung zukünftiger Ereignisketten. In deren Fortgang sollten alle möglichen, sonst vielleicht unbedacht bleibenden »bizarre actions« (Kahn) eintreten und anschließend miteinander verglichen werden können.⁴⁵ Ganz analog waren Nuklearforscher an einer differenzierten Exploration der Hypothetizität und einer detaillierten quantifizierenden Aufschlüsselung der bei einem HCDA auflaufenden Prozesse interessiert. Ebenso wie bei Kahn treten dabei Computersimulationen in den Fokus:

»Fast reactor safety research began many years ago with theoretical studies of prompt critical excursions which have been continued with sustained enthusiasm by teams in many countries. Naturally the early investigations were relatively simple, with emphasis on analytical solutions, but theoretical studies have steadily increased in depth and sophistication and have extended their scope to embrace more and more of the accident sequence preceding and following a sudden reactivity addition. In the last decade there has been a general burgeoning of large, comprehensive computer codes.«⁴⁶

III. *Modeling the Impossible: »Parametrisierung von Unwissen«*

Die Diversifizierung möglicher Ereignisketten durch Computersimulationen von Hypothetical Core Disruptive Accidents ist eine erste Ausweitung des Hypothetizitätsgedankens. Nun sollen nicht mehr nur ein Grenzfall, sondern viele mögliche Störfallverläufe komparativ und in tieferer Detailschärfe untersucht werden. Der »theoretische«, noch mehr als mathematisiertes Gedankenspiel funktionierende Bethe-Tait-Störfall fächert sich auf in multiple »mechanistische numerische Simulationen«.⁴⁷ Triebfeder dieser Entwicklung waren ökonomische Faktoren, die durch den Skalenwechsel von kleinen Experimentalreaktoren wie den EBR-Projekten – für diese war der Bethe-Tait-Störfall ja konzipiert worden – zu kommerziellen Brüterprojekten entsteht:

»The complexity of the problem has been side-stepped by basing designs on highly conservative bounding estimates of the »damage potential«. [...] This approach worked well for small breeders [...]. However, for the large breeders being considered today, the bounding approach places difficult if not impossible demands on design. For a hypothetical

44 Vgl. Herman Kahn: *Thinking About the Unthinkable*, New York 1962, S. 165; vgl. Claus Pias: »»One-Man Think Tank«. Herman Kahn, oder wie man das Udenkbare denkt«, in: *Zeitschrift für Ideengeschichte* 3 (2009), Heft 3, S. 5–16.

45 Kahn, *Thinking About the Unthinkable*, S. 165.

46 Barry Bruce-Biggs: *Supergenius. The Mega-Worlds of Herman Kahn*, New York 2000, S. 345.

47 Jochen Benecke: »Die kompromittierte Wissenschaft«, in: Meyer-Abich (Hg.): *AUSgebrütet*, a.a.O., S. 264.

core-disruptive accident of a given energy-density level, damage potential increases approximately in proportion to reactor size, whereas the ability of reasonable designs to absorb damage scales weakly, or even inversely, with reactor size. As a result, [...] an impasse may be reached in the licensing process.«⁴⁸

Computergestützte numerische Ansätze wurden mithin dazu verwendet, ein solches ›Impasse‹ zu verhindern, d.h. die pessimistischen Annahmen des frühen Bethe-Tait-Modells zu relativieren. Vater dieses Gedankens war der Wunsch, dass eine genauere Quantifizierung der Vorgänge weitaus geringere Gefahrenpotenziale ergeben würde. Es ging um eine genauere Vorhersage des nicht Vorgesehenen und um die Inan-griffnahme zielgerichteterer Vorkehrungen: »In the mechanistic approach, we trace the course of the accident in a cause and effect way looking at the actual physical phenomena as we believe them to occur. [...] The method also provides us with a quantitative tool to study experimental information.«⁴⁹ Dieser Wunsch erfüllte sich – eine Skalierung der Experimentalbrüter hoch zu Großbrütern erschien plötzlich annehmbar. So wurde z.B. Ende der 1970er Jahre in Bezug auf die Kernzerfalls-Simulationssoftware SIMMER notiert: »The conclusions so far? The pressure and temperature surges expected in hypothetical accidents appear to be much less than previously estimated. As a result, management of this sophisticated alchemy may be safer than imagined.«⁵⁰

Der Weg hin zu derartigen Einschätzungen war diesseits und jenseits des Atlantik gepflastert mit emsigen Programmieraktivitäten. Diese reichten von der numerischen Modellierung verschiedenster möglicher thermischer und hydraulischer Reaktionen im Verlauf einer Kernschmelze⁵¹ über Dampfexplosionen, Interaktionen zwischen Natriumkühlung und Reaktorbrandstoffen, Deformationen von Brennstäben durch Druckänderungen der Kühlflüssigkeit, Wärmetauscher,⁵² Abschirmeigenschaften verschiedener Materialien, hin zur Berechnung von Neutronenkollisionen oder Turbinenmodellen.⁵³ Ein 1977 herausgegebenes *Compendium of Computer Codes for the Safety Analysis of Fast Breeder Reactors* beschreibt über 100 Codes allein für die Analyse von LMFRs – für deren Design wurden noch einmal ganz andere Softwares verwendet.⁵⁴ Diese Programmvielfalt reflektierte einen weiteren

48 Bell: »Breeder Reactor Safety«, in: *Los Alamos Science*, a.a.O., S. 108.

49 Avery: »Fast Reactor Safety Research Needs«, in: American Nuclear Society (Hg.): *Proceedings of the Fast Reactor Safety Meeting*, a.a.O., S. 382.

50 Bell: »Breeder Reactor Safety«, in: *Los Alamos Science*, a.a.O., S. 100f.

51 Vgl. Alan E. Waltar u.a.: »Melt-III. A Neutronics, Thermal-Hydraulics Computer Program for Fast Reactor Safety Analysis, Volume I«, in: *Hanford Engineering Development Laboratory Working Paper HEDL-TME 74-47 UC-79p, e, d, b*, Dezember 1974.

52 Vgl. American Nuclear Society (Hg.): *Proceedings of the Fast Reactor Safety Meeting*, a.a.O., S. 679–784.

53 Vgl. Robert Avery: »Reactor Computation Methods and Theory«, in: *Applied Physics Division Annual Report 1971*, S. 367–456.

54 Vgl. hierzu Philip M. Boffey: »Nuclear Safety: A Federal Adviser's Warnings Provoke Ire of Colleagues«, in: *Science* 192 (1976), S. 978–979, hier S. 978.

Faktor, der Häfeles Konzept der Hypothetizität auszeichnete. Die nicht mehr *in realiter* testfähigen Zusammenhänge sollten nur mehr *in silico* adressiert werden: Durch eine Strategie der Verknüpfung partieller, unvollständiger Wissensbereiche, für die jeweils spezielle Rechenprogramme entwickelt werden.

Die Verknüpfung dieser verschiedenen Programme folgte jeweils wieder einem Rückgriff auf hypothetische Elemente. Dadurch sollte sukzessive ein nicht notwendig vollständiges, aber hinreichend genaues Verständnis komplexer Zusammenhänge generiert werden. Und damit, so Häfele, sei die Sicherheit kerntechnischer Systeme bereits in ihrer simulationsgestützten Vorausschau, d.h. aus ihrer Konstruktionsphase heraus bestmöglich zu beurteilen.⁵⁵

Ein derart schwacher Wissensbegriff im Kontext hochgefährlicher Technologien forderte natürlich Widerspruch heraus. Exemplarisch zitierte der Brüter-Kritiker Thomas Cochran auf einem *Fast Reactor Safety Meeting* 1974 in Beverly Hills einen Experten: »As Henry Kendall, an MIT nuclear physicist, warns, »mathematical models cannot be used reliably to span large gaps in engineering knowledge, owing to the very great uncertainties that accumulate in long and unverified chains of inference.«⁵⁶ Für das Gros der Brüter-Forscher, so stellt Cochran fest, gelte jedoch: »Less than full understanding [...] permits setting upper bounds on the consequences of hypothetical accidents.«⁵⁷

Den meisten Beteiligten genügte »weniger als ein umfassendes Verständnis«. Denn wo analytische Ansätze der Beschreibung von Teilchenbewegungen in nuklearen Zerfallsprozessen zu nicht mehr handhabbaren Formelmonstern führen und kontrollierte Experimente – sogenannte *integral core destructive tests* – aufgrund ihrer Auswirkungen auf die Umwelt nicht möglich sind, kommt der dritte Weg der Simulation ins Spiel. Und damit auch eine Epistemologie, die nicht mehr an »der« wissenschaftlichen Wahrheit interessiert ist, sondern an hinreichend aussagekräftigen Präsentationen bestimmter Prozesse im Realen. Mit Peter Galison gesprochen, dekonstruierte dieser dritte Weg gewissermaßen die Grenzen zwischen Mathematiker und Experimentator und zwischen theoretischer und angewandter Physik. Auf immer schnelleren Rechnern entwarfen nun Computersimulationen »alternative realities«,⁵⁸ in denen wiederum entsprechende Versuche als Computerexperimente⁵⁹ durchge-

55 Vgl. Meyer-Abich: »Die risikoanalytische Bewertung des Brüters«, in: Ders. (Hg.): *AUSgebrütet*, a.a.O., S. 113.

56 Thomas B. Cochran: »LMFBR Safety Research. A View From Outside«, in: American Nuclear Society (Hg.): *Proceedings of the Fast Reactor Safety Meeting*, Beverly Hills, 2.–4.4.1974S. 402–410, hier S. 408.

57 Ebd., S. 408.

58 Vgl. Peter Galison: »Computer Simulations and the Trading Zone«, in: Ders. und D. J. Stump (Hg.): *The Disunity of Science. Boundaries, Contexts, and Power*, Stanford 1996, S. 118–157, hier S. 119.

59 Vgl. Gabriele Gramelsberger: *Computerexperimente. Zum Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers*, Bielefeld 2010.

führt werden konnten. Im Zentrum stand hierbei nicht mehr eine möglichst genaue *Repräsentation* von Phänomenen der Realität, sondern eine – oft auch und gerade durch wissentlich unrealistische Annahmen erzeugte – *Vorahnung* des Verhaltens der in den Simulationen präsentierten Systemdynamik. Der Berliner Mathematiker Bernd Mahr bezeichnete die Arbeit mit Computersimulationen daher mit Recht als eine »Verhaltenswissenschaft von Systemen«,⁶⁰ denn ihr Verhalten musste wiederum mit Bedacht und in vergleichender Analyse interpretiert werden. Der Physiker H. J. Teague fasste dies für die Brutreaktorforschung folgendermaßen zusammen:

»The importance of theoretical analysis cannot be exaggerated, and its indispensable tool is the computer. Both for handling the complex calculations and large masses of data required to extrapolate from experiment to accident conditions and for surveys to establish the importance of the several variables it is necessary to develop large, specialized codes.«⁶¹

Gerade für die Erforschung des Zusammenspiels verschiedener Systemdynamiken war jedoch eine synthetisierende Methode unerlässlich. Willy Marth, leitender Mitarbeiter am bundesdeutschen Schnellbrüterprojekt SNR-300 im niederrheinischen Kalkar, erklärte das Ziel dieser quantifizierenden Verhaltenswissenschaft eines HCDA: Es ging bei der Simulation der verschiedenen Abläufe um die Identifikation der Einzelglieder der Störfallablaufkette, vor allem aber um den physikalischen Nachweis, »daß diese nicht zwangsläufig von Anfang bis Ende durchlaufen wird«.⁶² Die Komplikation der Simplifikationen des Bethe-Tait-Tests sollte unterschiedliche mögliche Unfallverläufe kalkulieren, die gar nicht notwendigerweise in einer Explosion endeten und die Eintrittswahrscheinlichkeit der Hypothetischen Kernzerlegung weiter verringern würden. Die Modelle konnten z.B. mehr und mehr Inkohärenzen im Erhitzungsprozess eines Reaktorkerns mit seinen hunderten Brennstäben berücksichtigen, die im Bethe-Tait-Modell noch uniform behandelt wurden. Dadurch ergaben sich massive Abweichungen vom dort postulierten linearen Ablauf. Die meisten Szenarien führten eher zu subkritischen Kernschmelzen, bei denen »nur« das Auffangen und die beständige Kühlung des geschmolzenen Materials sichergestellt werden musste.⁶³ Marths Geschichte des SNR-300 gibt auch einen Eindruck von den Versuchen einer möglichst umfassenden und integrativen Simulation verschiedener Einflussfaktoren:

60 Vgl. Bernd Mahr: »Modellieren. Beobachtungen und Gedanken zur Geschichte des Modellbegriffs«, in: Horst Bredekamp und Sybille Krämer (Hg.): *Bild – Schrift – Zahl*, München 2003, S. 59–86.

61 H. J. Teague, »Fast Reactor Safety Research Needs – What, Why, How and When?«, in: American Nuclear Society (Hg.): *Proceedings of the Fast Reactor Safety Meeting*, Beverly Hills, 2.–4.4.1974, S. 343–357, hier S. 355.

62 Vgl. Willy Marth: *Der Schnelle Brüter SNR 300 im Auf und Ab seiner Geschichte*, Karlsruhe 1992, S. 53–55.

63 Vgl. Waltar: *Fast Breeder Reactors*, a.a.O., S. 567–703.

»Die Code-Entwicklung wurde entsprechend der Verfügbarkeit effektiver Rechenmaschinen vorangetrieben [...]. Die theoretischen Untersuchungen zu den Bethe-Tait-Störfällen hatten schon vor 1970 mit der Aufstellung der Programmsysteme REX und FAUN-Z begonnen. Für den SNR 300 wurde Ende 1971 von KfK und Interatom in einer gemeinsamen crash-Aktion [sic!] mit dem Argonne National Laboratory (ANL) die hypothetischen Störfälle durchgerechnet. Es wurden zwei Unfallketten analysiert: Pumpenausfall und Reaktivitätsunfall bei gleichzeitigem Versagen der zwei unabhängigen Abschaltssysteme. Mit Hilfe der Rechenprogramme SAS 2A und VENUS wurden die Kernschmelzvorgänge in der Zerstörungsphase untersucht. Unter Benutzung des Modells von Cho-Wright wurden mechanische Energiefreisetzen zwischen 50 und 200 MWs errechnet, denen der SNR 300-Tank widerstehen konnte. Diese Untersuchungen führten in der Folge in Karlsruhe zur Entwicklung eines modulartig aufgebauten Rechenprogramm-Systems, das etwa dem Leistungsstand der fortgeschrittensten Codes des ANL entsprach. Zur Analyse der Phase vor der Reaktor-Desintegration stand ab 1973 der Code CAPRI-2 zur Verfügung. Er verwendete Punktkinetik und erlaubte die Verarbeitung von 30 charakteristischen Kühlkanälen. Wichtige Elemente von CAPRI-2 waren der Brennstabmodul BREDA und der Siedemodul BLOW 3 [sic!]. Für die Phase der Desintegration bediente man sich des Programms KADIS, welches auf einer älteren Version von VENUS beruhte und in Karlsruhe wesentlich verbessert wurde. Die Analyse der mechanischen Belastung der Strukturen oblag der Firma Interatom, welche sich der Codes HEINKO, DRAP und ARES bediente.«⁶⁴

Abb. 4 zeigt ein vereinfachtes Ablaufdiagramm des SAS-Codes für die Einleitungsphase eines HCDA.

So kryptisch dies im Detail klingen und aussehen mag, so klar wird zumindest dreierlei: erstens die Vielzahl involvierter Rechenprogramme, zweitens die organisationsübergreifende Kooperation bei der Entwicklung, und drittens die Abhängigkeit der Programmierung von verfügbarerer Hardware. Alle drei Sachverhalte machten eine modulartige Integration in eine Simulation des Gesamtsystems nicht unbedingt einfach. Häfele selbst unterstrich in seinem 1968 erschienenen Text *On the Development of Fast Breeders* vor allem den letzteren Faktor, indem er auf die intrinsische Verbindung umfassender Reaktorphysik-Berechnungen und Rechenkapazitäten hinweist – etwas, das heute als »Simulability«⁶⁵ bezeichnet wird:

»The [...] calculation of large fast second generation breeders in general require[s] as of today three dimensional calculations [...]. This just fits the calculation capability of today's computers, say IBM 360/65 (or better 360/91) or CDC 6600. [...] It is possible, as the art develops, four dimensions can and have to be handled and this requires the next generation of big computers. It should be realized how strong this interlink is.«⁶⁶

64 Marth: *Der Schnelle Brüter SNR 300*, a.a.O., S. 53 und 55–56.

65 Thomas Lippert: »The Impact of Petacomputing on Theories and Models«, in: *The Societal and Cultural Influence of Computer Based Simulations*, Berlin 2007, o.S.

66 Vgl. Häfele: »On the Development of Fast Breeders«, in: *Kernforschungszentrum Karlsruhe Research Paper KfK-881*, a.a.O., S. 6.

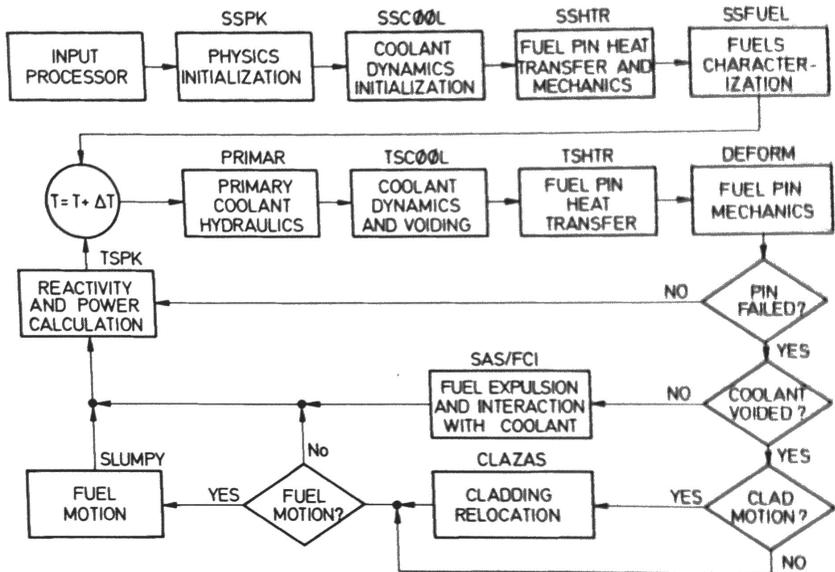


Bild 10.18. Vereinfachte Darstellung der Struktur des SAS 3D-Codes

Abb. 4: Ablaufdiagramm der Einleitungsphasen-Simulation eines Kernzerlegungsstörfalls mit der Software SAS-3D.

Damit ist jene eingangs erwähnte historische Verbindung von High Performance Computing und Kernforschung angesprochen – der CDC 6600 ist ein konzeptueller Vorläufer des ersten Supercomputers CRAY-1⁶⁷ – eine der Möglichkeitsbedingungen der quantitativen Exploration des technischen Nichtwissens um die Prozesse während eines Kernzerlegungsstörfalls. Mit der Software-Entwicklung, der anderen Möglichkeitsbedingung, gehen Kritiker derweil hart ins Gericht. So seien die gekoppelten physikalischen Vorgänge der involvierten »Mehrphasen- und Mehrkomponenten-Fluiddynamik mit ihren komplexen thermischen und neutronischen Wechselwirkungen«⁶⁸ nicht ausreichend verstanden, um sie mathematisch zu modellieren. Eine durchgehende Simulation eines HCDA sei nicht möglich, da nur ausschnittthaft bestimmte Phasen berechnet würden. Zwischen diesen Phasen wiederum müssten Anpassungen und Übertragungen vorgenommen werden, was die Bezugnahme auf zusätzliche Annahmen erfordere. Auch müssten weiterhin oft starke Vereinfachun-

67 Vgl. Sebastian Vehlken und Christoph Engemann: »Supercomputing«, in: *Takt und Frequenz. Archiv für Mediengeschichte*, Weimar 2011, S. 143–161.

68 Benecke: »Die kompromittierte Wissenschaft«, in: Meyer-Abich (Hg.): *AUSgebrütet*, a.a.O., S. 264–265, hier S. 265.

gen gemacht werden. Sehr viele Parameter seien schlichtweg nicht genau bekannt – etwa die Viskosität oder die thermodynamischen Zustandsdaten von Brennstoffen jenseits von 2000 °C. Und schließlich sei es aufgrund der Rechenzeiten für Simulationen durchläufe praktisch unmöglich, Sensitivitätsanalysen durchzuführen, um die Auswirkungen von Parameterveränderungen systematisch zu verfolgen.⁶⁹

»Wollte man etwa für fünf wichtige Parameter je fünf unabhängig ausgewählte Werte durchspielen, käme man schon auf 3125 Rechenläufe (also fast 2 Jahre reine Rechenzeit bei fünf Stunden pro Lauf). [...] Oberflächlich erscheinen die Codes mechanistisch [...]. Bei näherem Hinsehen stützen sich die Modellierungen der Codes aber auf kleine Simulationsexperimente, vereinfachte Experimente in Testreaktoren, Tradition und Spekulation. Die Wahl vieler Parameter, die den Ablauf, die Zeitskalen und die Energiefreisetzung des verursachten Störfalls bestimmen, ist dem Benutzer überlassen. Um einen der Entwickler zu zitieren: »Wir parametrisieren unsere Unwissenheit.«⁷⁰

Die von Simulations-Entwicklerseite in Aussicht gestellte größere Detailtiefe in Bezug auf bestimmte Schlüsselprozesse im Ablauf eines HCDA bringt mithin mannigfache neue epistemische Unsicherheiten und »Parametrisierungen von Unwissenheit« mit sich – Robert Jungk schrieb abfällig über die »spekulative Wissenschaft der Computersimulation«.⁷¹ Dieses spekulative Element findet sich bei der Verbindung von Teilen der Ereigniskette, in denen Rechenmodelle jeweils ein wesentlich besseres Verständnis der physikalischen Vorgänge erzeugten – dies galt vor allen Dingen für die Phase vor der Desintegration des Reaktorkerns. Sei diese jedoch erst einmal eingetreten, stoße die Simulation an prinzipielle Grenzen:

»Computer modeling of fuel and cladding movements, and their interaction with sodium coolant, following the loss of geometric integrity of the reactor core borders on witchcraft. The possible scenarios from this point to the end game are infinite. Many simplifying assumptions have to be made. There are so many variables and assumptions that an analyst can manipulate the calculations to predict any size energy release – anything from a partial core melt as occurred in the Fermi-I reactor to a catastrophic explosion rupturing the integrity of the reactor vessel.«⁷²

Die mannigfachen HCDA-Simulationstools moderierten mithin die Hypothetizität von Störfällen, indem sie Teile dieser Prozesse als Wissen sicherten und verknüpften, zugleich aber auch Bereiche des Nichtwissens und ungesicherte Verknüpfungen bis auf Weiteres zuließen. Dieses »Weitere« floss – vor allem von Kritikerseite – immer massiver als Forderung nach experimentellen Verifikationen von Simulationsszenarien und ihrer Outputs in die Sicherheitsdebatte um Schnelle Brüter ein. Kom-

69 Vgl. Benecke: »Die kompromittierte Wissenschaft«, in: Meyer-Abich (Hg.): *AUSgebrütet*, a.a.O., S. 264–265.

70 Ebd., S. 266.

71 Vgl. Jungk: *Der Atom-Staat*, a.a.O.

72 Vgl. Thomas B. Cochran: »The Plutonium Burner«, in: *Proceedings of the International Conference on Plutonium*, Omiya, Japan, 2.–4. November 1971, S. 119–151.

plementär wurde eine bessere Basis von empirischen Input-Daten für die Computermodelle verlangt:

»Undoubtedly they can be a powerful tool, particularly for the parametric study of wide-ranging factors. Nevertheless, where there is greater complexity one may reasonably wonder to what extent any conclusions are peculiar to the details of the particular theoretical model concerned. One may also ask if the available physical data are extensive enough to support the entire logical structure. Such skepticism is necessary and does not appear unduly to discourage code development.«⁷³

Doch eine nähere Betrachtung dieser experimentellen Komplementärseite fördert jene in der Nuklearforschung brüchig gewordene epistemologische Wechselbeziehung von Theoriebildung und experimentellem Nachweis eindrücklich zutage. Beispielhaft zeigt sich dies zunächst an experimentellen Stabilitätstests des Reaktorgehäuses, die nicht nur numerisch kalkuliert, sondern auch in sogenannten *Scale-Model*-Tests erforscht wurden.⁷⁴ Im Fall des Kalkar-Brüters wurde dabei ein 1:6-Maßstabmodell des geplanten Reaktors – durch eine Explosion mit chemischem Sprengstoff und unter Verwendung von Wasser statt Natrium für den Kühlkreislauf – der angenommenen Maximalbelastung eines Bethe-Tait-Störfalls in der fertigen Großanlage ausgesetzt (Abb. 5).

Die Verformungen und Belastungswerte des Behälters und seiner Bestandteile (z.B. Ventile und Verschraubungen) sollten durch aufwändige Messinstrumentierung aufgezeichnet werden. Zusätzlich bestanden die bundesdeutschen Genehmigungsbehörden darauf, die Ergebnisse des Experiments von den HCDA-Softwares des Projekts vorausberechnen zu lassen, um die Ergebnisse im Nachgang zu vergleichen und damit die Nutzbarkeit der Codes zu verifizieren.⁷⁵

73 Teague: »Fast Reactor Safety Research Needs«, in: American Nuclear Society (Hg.): *Proceedings of the Fast Reactor Safety Meeting*, a.a.O., S. 345.

74 Vgl. z.B. M. Eglème, J. P. Fabry, H. Lamotte: »Nuclear Accident Simulation in a 1/6 Scale Model of the SNR-300 Fast Breeder Reactor«, in: *Nuclear Engineering and Design* 42 (1977), S. 115–122.

75 Ebd., S. 115.

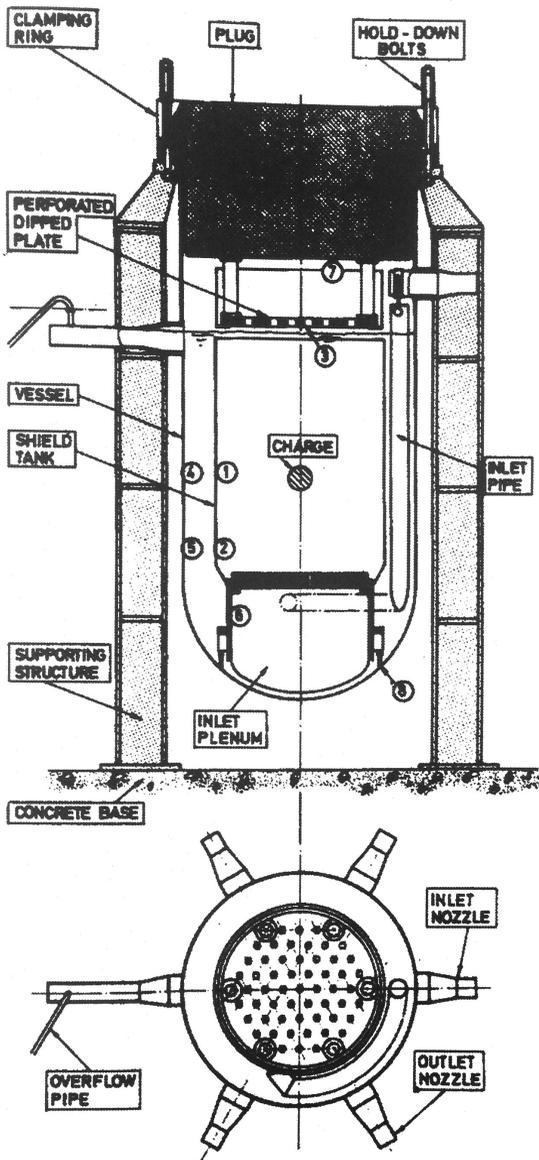


Abb. 5 Aufbau des 1/6-Maßstabmodells des SNR-300-Reaktorbehälters

Das Experiment bewies erfolgreich die Stabilität des Gehäuses, doch seine Zusammenfassung kommt zu epistemologisch interessanten Aussagen:

»The agreement between the precalculations and the experimental results is not perfect. [...] It does not mean that the code can give any desired results but it is obvious that knowing the experimental circumstances and the measurements, the choice of the computer model and of the data is more evident. Although an »a posteriori« interpretation would apparently yield more encouraging results, this kind of precalculation is probably the best way to make the theorists think to what could happen in the vessel instead of asking them simply to explain what has happened in it.«⁷⁶

6Versuchsergebnisse, so wird deutlich, dienten weniger als Beweis oder Widerlegung theoretischer Annahmen und ihres Durchspielens in Computersimulationsmodellen im Sinne einer Identitätsbeziehung oder größtmöglichen Ähnlichkeit. Andersons wurden Notkühlversuche z.B. nicht an nuklearen Brennelementen, sondern an elektrischen Heizstäben durchgeführt.⁷⁷ Auch solche Experimente beruhten auf hochgradig abstrahierten Analogien zu den modellierten Prozessen, und der Erkenntnisgewinn lag gerade im Differenzbereich der jeweiligen Ergebnisse – in einer besseren Einschätzung der *möglichen* Vorgänge, nicht einer Verifikation der *tatsächlich* abgelaufenen.

Hinzu kommt, dass Tests wie dieser sich oft nur auf einen Teilbereich der geplanten Anlage bezogen. Zwar wurden für den SNR-300 auch Großkomponententest in eigens dafür gebauten Testanlagen realisiert. Dort prüfte man z.B. Dampfturbinen, Kühlaggregate, Detektorsysteme für Lecks, Bedienarmaturen oder Flussdynamiken der Kühl- und Mediatorkreisläufe im 1:1-Modell.⁷⁸ Da jedoch aus zeitlichen oder finanziellen Gründen nicht alle Subsystemtests innerhalb des eigenen Projekts durchgeführt werden können, griffen die Entwickler – soweit z.B. über Kooperationen zugänglich – oftmals auf die Daten und Erfahrungen aus anderen internationalen Brüter-Entwicklungsprojekten zurück. Zusätzlich zur dabei entstehenden Frage nach der Übertragbarkeit von Wissen aus anderen Kraftwerkskonstruktionen erzeugten sie lediglich ein Wissen über das Zusammenspiel einer begrenzten Anzahl von Komponenten. Sensible Abläufe und Unfallszenarien, wie etwa die Diffusion radioaktiver Stoffe in der Atmosphäre oder die Haltbarkeit von Schutzeinrichtungen und Umarmantelungen, bleiben ohnehin Gegenstand theoretischer Überlegungen und mathematischer Formalisierung. Sie konnten nur in sehr beschränktem Maße mittels La-

76 Ebd., S. 122.

77 Vgl. W. Baier: »Generalprobe für den Atomunfall«, in: Frankfurter Rundschau, 05.12.1975, zit.n. Joachim Radkau: Aufstieg und Krise der deutschen Atomwirtschaft 1945–1975. Verdrängte Alternativen in der Kerntechnik und der Ursprung der nuklearen Kontroverse, Reinbek 1983, S. 370.

78 Vgl. Marth: *Der Schnelle Brüter SNR 300*, a.a.O., S. 54–62. Vgl. z.B. P. Ludwig und B. Hus: »Some Results of the 50MW Straight Tube Steam Generator Test in the TNO 50MW SCTF at Hengelo«, in: *Summary Report. Study Group Meeting on Steam Generators for LMFBR*, Bensberg, 14.-17.10.1974, S. 269–281.

borexperimenten erforscht werden – wenn sie nicht als Erfahrungen aus vergangenen Störfällen oder Beinahe-Katastrophen in Nukleuranlagen in die Formeln und Einschätzungen einfließen.⁷⁹ Auch das Verhalten von Brennstäben in Bezug auf hydrodynamische Belastungen durch die Kühlflüssigkeit oder die Verformung der Brennstäbe oder ihrer Hülle bei hohen Temperaturen wurde in isolierten Testreihen erforscht.⁸⁰

»Experimente gibt es nur zu Teilphänomenen. Ich will hier nicht für sogenannte integrale Tests sprechen, in denen sozusagen der gesamte Reaktor auf den Prüfstand kommt. Für Leichtwasserreaktoren hat es solche Tests gegeben: Bei ihnen wurden Bedingungen herbeigeführt, unter denen sich der Reaktorkern selbst zerstörte und dabei das gesamte Gebäude mit Druckstößen und Hitzewellen belastete. Für Brutreaktoren sind entsprechende Tests nicht durchgeführt worden; wenn sie auch wahrscheinlich nicht entbehrlich sind, so sind sie doch unpraktisch und teuer. Vom Prüfstand, d.h. den Instrumenten, bliebe vielleicht nichts übrig – wo auch in Europa gäbe es ein geeignetes und für die Bevölkerung akzeptables Testgelände? Integrale Tests würden auch nur dann die notwendige Information liefern, wenn man sie oft wiederholte, was wiederum nicht praktikabel ist.«⁸¹

Die Ergebnisse solcher Large-Scale-Tests wären ohnehin kaum verallgemeinerungsfähig, unterschieden sich doch die Zusammensetzung der Brennstäbe und die Konstruktionen der verschiedenen Brüter-Projekte der 1960er und 1970er Jahre meist recht stark voneinander.

Der Erkenntniswert experimenteller Untersuchungen für die hochkomplexen, gekoppelten Systeme und Vorgänge in einem Brutreaktor lag mithin weniger in der Verifikation theoretischer Annahmen oder von Simulationsdaten. Experimente hatten selbst eher Modellcharakter und trugen damit ebenfalls den Index hypothetischen Wissens. Epistemologisch situieren sie sich auf gleicher Ebene wie Computersimulationen als Elemente eines Gewebes aus partiellen Wissensbestandteilen. Auch Experimente lösten keineswegs das grundlegende Dilemma komplexer Technologien wie Schneller Brüter: »We can always improve our knowledge about contingent elements, but we can never make it complete. This restates the proposition that the residual risk can be made smaller than any given small number but it can never be reduced to zero.«⁸²

79 Vgl. hierzu z.B. American Nuclear Society (Hg.): *Proceedings of the Fast Reactor Safety Meetings*, a.a.O.

80 Vgl. z.B. Fritz Thümmel: »Bestrahlungseinfluss auf das Verhalten von SNR 300-Brennstäben bei hohem Abbrand«, in: Kernforschungszentrum Karlsruhe (Hg.): *Statusbericht Schneller Brüter 1974, KFK-2003*.

81 Benecke: »Die kompromittierte Wissenschaft«, in: Meyer-Abich (Hg.): *AUSgebrütet*, a.a.O., S. 263.

82 Ebd., S. 53.

IV. Vom China Syndrome zu Sicherheitsphilosophien

Um Lizenzierungsanforderungen und den Sorgen einer zunehmend Brüter-kritischen Öffentlichkeit besser begegnen zu können, reichernten Nuklearforscher das durch Bounding Accidents, »mechanistische« Computersimulationen und Experimente nur in Teilen fassbare technische Nichtwissen um eine hypothetische Kernschmelzen um eine komplementäre Methode an. Durch probabilistische Verfahren sollten die Freiflächen im Gewebe partiell gesicherter Wissensbestandteile besser situiert werden:

»In the probabilistic methodology, we are able to introduce the concepts of probability for events happening and also probability for various consequences resulting from specific events. We can use the latter probability distributions both for accounting for calculational uncertainties or for natural distributions in the results that might result from specific initial conditions.«⁸³

Als ingenieurstechnische Methode der Risikoanalyse werden dabei z.B. Ausfallwahrscheinlichkeiten für einzelne Systembestandteile definiert, die dann in Flowchart-ähnlichen Strukturen einer Fehlerbaumanalyse zugeführt wurden. So wurde eine Vielzahl möglicher Szenarien unter verschiedene Risikogruppen einteilbar (Abb. 6).⁸⁴

Ein Ereignis – z.B. der Ausfall der Kühlung – wurde vorgegeben und dann nach allen möglichen Unfallursachen gesucht, die zu diesem Ereignis hätten führen können. Damit sollte die Identifikation kritischer Systemstellen innerhalb einer Vielzahl von Ausfallkombinationen verschiedener Komponenten und Teilsysteme sichergestellt werden und die verteilten Elemente und Daten der hypothetischen Wissensmatrix in einen besser einschätzbaren, systemischen Zusammenhang gebracht werden.⁸⁵

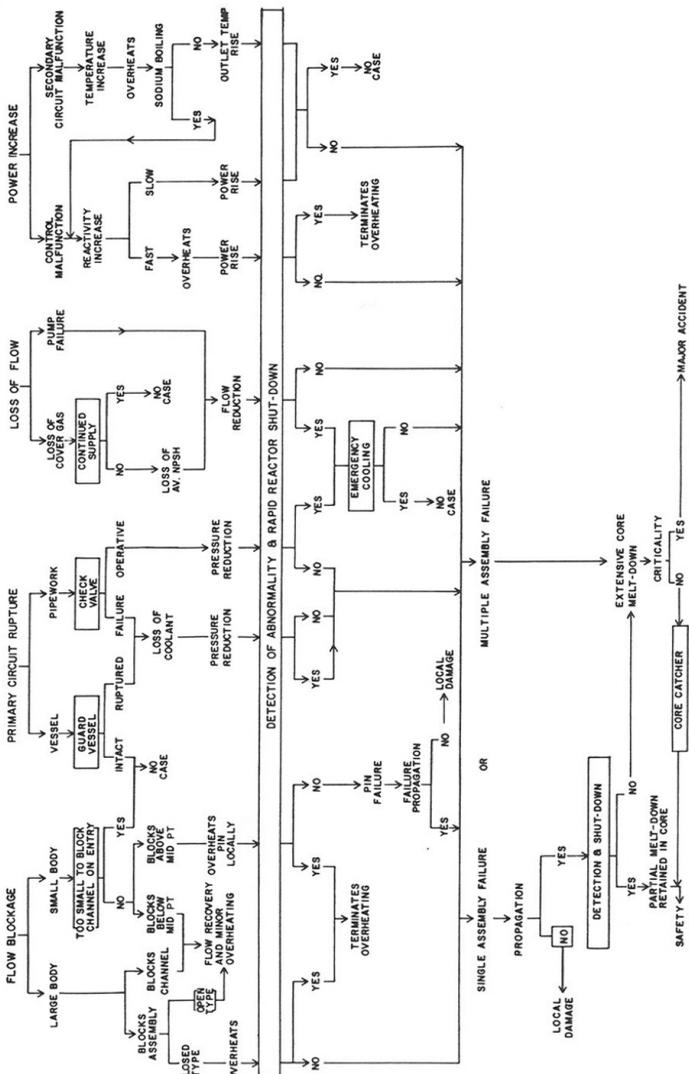
Doch auch dabei ergaben sich Anschlussprobleme. So notierten Alan Waltar und Albert Reynolds in ihrem Standardwerk zu Brutreaktoren: »A major difficulty in employing the probabilistic approach is that the distribution functions for the numerous parameters of uncertainty are not well known. Little failure data are available for systems which have low failure rates.«⁸⁶ Der hypothetische Charakter der Störfälle beeinflusst deren probabilistische Beschreibung: Wo diese (noch) nicht eingetreten sind, da ist die Annahme realistischer Eintrittswahrscheinlichkeiten arbiträr.

83 Avery: »Fast Reactor Safety Research Needs«, in: American Nuclear Society (Hg.): *Proceedings of the Fast Reactor Safety Meeting*, a.a.O., S. 383.

84 Vgl. Graham: *Fast Reactor Safety*, a.a.O., S. 48–65. Vgl. hierzu auch die Methoden des sogenannten Rasmussen-Reports, der ersten großangelegten Reaktorsicherheitsprüfung in den USA: Norman C. Rasmussen u.a.: *Report of the Reactor Research Review Group: submitted to the President's Nuclear Safety Oversight Committee*, Washington, DC: 1981. Auch für den SNR-300 wurden im Auftrag des BMBF zwei Risikostudien erstellt.

85 Vgl. Gesellschaft für Reaktorsicherheit (Hg.): *Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Phase B*, Köln 1990, S. 16.

86 Waltar: *Fast Breeder Reactors*, a.a.O., S. 529.



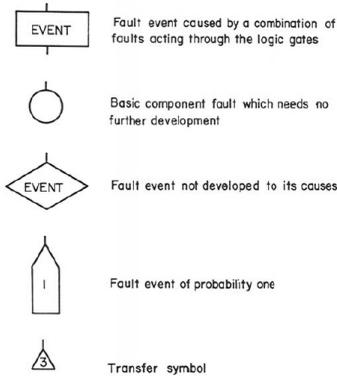
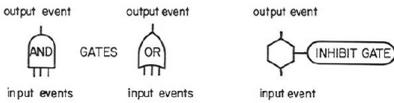


Abb. 6 Schlotoperatoren und Schaltdiagramm einer Fehlerbaumanalyse

Auch die Kombination mechanistischer und probabilistischer Methoden lässt mithin Bereiche des Nichtwissens zurück, so dass sich hier die Integration einer weiteren Ebene der Hypothetizität anschließt. Da man nicht mit Sicherheit sagen konnte, durch welche Fehlfunktion ein Auslegungsstörfall, also der *Größte Anzunehmende Unfall*, ausgelöst werden würde, führte man für die wichtigsten Systembereiche redundante Containment-Maßnahmen ein:

»The concept of containment is to provide a series of barriers between the radioactive products of the fission process and the public. Any reactor has such barriers, and the LM-FBR has more than most. They are, successively: ceramic fuel that retains fission products; fuel-pin cladding; sodium coolant which absorbs radioactive iodine; primary circuit and vessel containment; containment building (possibly of two barrier construction); and exclusion distances.«⁸⁷

Damit dehnte sich der Bereich der Hypothetizität ein weiteres Mal aus. Nun wurde nicht mehr nur im Sinne von Vorsorgemaßnahmen und sicherer Reaktorhüllen gerechnet, sondern mit dem Versagen primärer Schutzmaßnahmen. Beim SNR-300 konzipierte man etwa für die Gebäudestruktur ein zweifaches Containment. Das innere, primäre Containment wurde nicht von außen belüftet, war also atmosphärisch von der Umwelt getrennt. Zudem wurde es mit einer Stahlauskleidung versehen, die den umgebenden Beton gegen die Hitze etwaig austretenden Natriums aus dem Kühlkreislauf isolieren sollte (Abb. 7).

87 Graham: *Fast Reactor Safety*, a.a.O., S. 255.

- | | |
|---|--|
| <p>Zone</p> <p>1 inneres Containment, inertisiert</p> <p>2 Bereich im äußeren Containment</p> | <p>Zone</p> <p>3 Unterdruckzone bei Reventing</p> <p>4 Bereich im Außengebäude</p> |
|---|--|

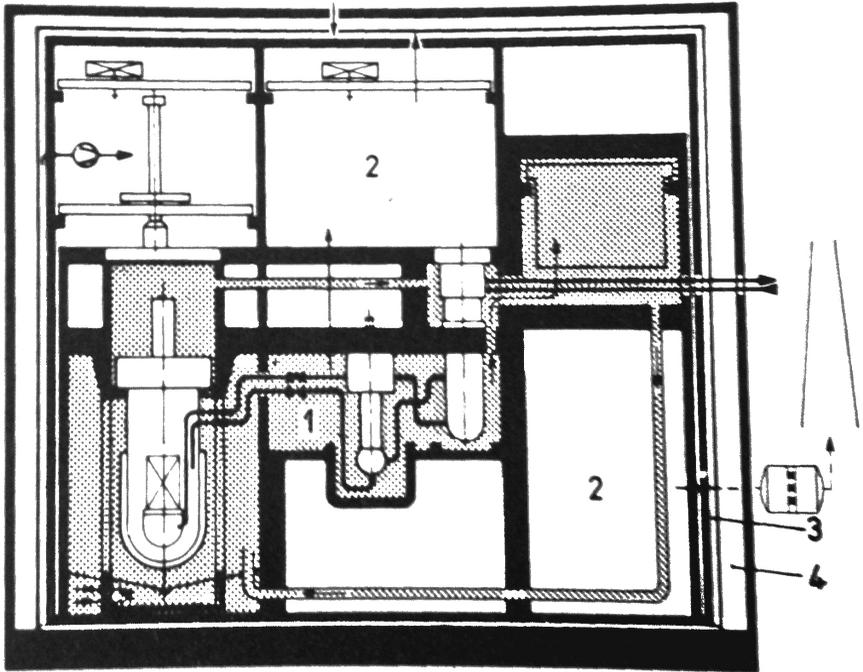


Bild 5.10. Sicherheitsbehälter des SNR-300 (Prinzip)

- 1 Primäres (inneres) Containment (inertisiert)**
- 2 Sekundäres Containment**
- 3 Spalt mit Unterdruck (Reventing)**
- 4 Reaktorgebäude**
- 5 Rückführungschanal für Naturkonvektionsströmung**

Abb. 7 Schematische Darstellung des SNR-300-Containmentsystems

Das sekundäre Containment konnte radioaktive Aerosole aus dem primären Containment aufnehmen – etwa bei einem durch eine Leistungsexkursion undicht gewordenem Reaktorgehäuse. Es sollte nach außen von einer zusätzlichen Unterdruckzone abgeschlossen werden, die austretende Gase absaugen sollte. Diese sollten

dann aktiv in die Containment-Struktur zurückventiliert werden. Sogenannte *Core Catcher* – gekühlte, extrem hitzeresistente Bodenplatten unter dem Reaktorgehäuse – sollten das Durchdringen schmelzender Reaktorkerne durch das Containment verhindern und somit dem in den US-Forschungen salopp *China Syndrome* genannten Vorgang vorbeugen, dass ein Kern sich in die Erde voranschmelzen würde. Von den USA wäre es in Richtung China vorgegangen, solange, bis ausreichender Kontakt mit Erdmaterial seine Hitze abgeleitet und gestoppt hätte.⁸⁸ Außerdem sollten ›Rekritikalitätseffekte‹ unbedingt vermieden werden, d.h. das Wiedereinsetzen von überkritischer Neutronenaktivität, wenn geschmolzenes Material sich an einer Stelle ansammeln oder nicht ausreichend gekühlt würde. Der Core Catcher war daher so konstruiert, dass er das geschmolzene Material möglichst flächig verteilt.⁸⁹

Diese Vervielfachung von Schwellen zwischen Reaktor und Außenwelt folgte einem kombinierten Prinzip von Redundanz und Diversität: Mithilfe mehrfacher Sicherungen und voneinander unabhängig funktionierender Abschalt- oder Kühlsysteme sollte der *Größte Anzunehmende Unfall* gehegt werden, wenn die aktiven Präventionsmaßnahmen versagt hätten. Die Vervielfachung dieser Maßnahmen erfolgte oftmals auf Druck von Lizenzierungsbehörden: »[T]he uncertainty in what a hypothetical accident demands in terms of technical measures makes this type of accident the ›stumbling stone‹ in a complex legal procedure.«⁹⁰ Beim SNR-300 wurden daher für viele Prozesse zwei unabhängige Sicherheitssysteme zugrunde gelegt, die zudem nicht identisch funktionierten: Zur Schnellabschaltung etwa waren einerseits automatisch von oben durch Schwerkraft in den Kern fallende und andererseits aktiv von unten in diesen hineingezogene SCRAM-Steuerstäbe geplant.⁹¹ Beide Sicherheitssysteme hätten zudem mehr Steuerstäbe getragen als eigentlich zur Unterbindung der Neutronenreaktionen nötig.⁹²

Dennoch wurden sowohl von Entwickler- wie auch Kritikerseite Einwände gegen das Redundanz-Prinzip laut: Erstens verteuerten sie die Kraftwerke – wie alle Containment-Maßnahmen – signifikant, bei fraglicher Notwendigkeit – »[s]ome designers may tend to believe in one Webster definition of the word redundancy: ›an act of needless repetition‹«.⁹³ Zweitens könne eine Diversität kaum garantiert werden – die beiden Schnellabschaltssysteme des SNR-300 seien »wegen des gemeinsamen Reaktortanks, des gemeinsamen Mediums, der annähernd gleichen Umgebungsbe-

88 Vgl. Okrent: *Nuclear Reactor Safety*, a.a.O., S. 102.

89 Vgl. detailliert Dieter Smid: *Reaktor-Sicherheitstechnik. Sicherheitssysteme und Störfallanalyse für Leichtwasserreaktoren und Schnelle Brüter*, Berlin 1979, S. 136f.

90 Helmut J. Hübel: »The Safety Related Criteria and Design Features for SNR«, in: American Nuclear Society (Hg.): *Proceedings of the Fast Reactor Safety Meeting*, Beverly Hills, 2.–4.4.1974, S. 3–28, hier S. 11.

91 Vgl. Wolf Häfele u.a.: *Fusion and Fast Breeder Reactors*, Laxenburg 1977, S. 289.

92 Vgl. Benecke, »Die kompromittierte Wissenschaft«, in: Meyer-Abich (Hg.): *AUSgebrütet*, a.a.O., S. 272.

93 Graham: *Fast Reactor Safety*, a.a.O., S. 146.

dingungen, des gemeinsamen Kerngerüsts sowie des Spülgassystems«⁹⁴ nicht vollkommen unabhängig voneinander zu betreiben. Und drittens konnte die Anreicherung der Komplexität der Gesamtanlage durch zusätzliche Systembestandteile wiederum zu neuen Fehlerquellen und Wechselwirkungen führen.

Die verschiedenen, sich aneinanderlagernden Ebenen hypothetischen Wissens, die sich sukzessive vom eingangs erwähnten Bethe-Tait-Störfall über die nachfolgend beschriebenen HCDAs bis hin zu den redundanten Containment-Maßnahmen dieses Abschnitts aufbauen, folgen historisch einem von den 1960er Jahren bis Mitte der 1970er Jahre stark zunehmenden Bewusstsein der Gefahrenpotenziale der Kernkraft, insbesondere bei Schnellen Brütern. Dies bleibt nicht ohne Einfluss auf die Genehmigungsverfahren – von behördlicher Seite wurden immer detailliertere Risikoabschätzungen und immer restriktivere Sicherheitsstandards für neue Anlagen und Technologien eingefordert. Deren Tragweite formuliert Willy Marth wiederum am Beispiel des SNR-300 im Stil eines vor unbezwingbaren bürokratischen Mächten in die Knie gehenden Pragmatikers:

»Die weiteren Forderungen der Behörden nach Tauchkühlern, Gasblasenabscheider, tankinterner Na-Eintrittsleitung und Aerosol-Umluft-System bedingten eine fast totale Umkonzipierung des SNR 300-Primärsystems. [...] Die Stahlblechhülle, welche als druckfester und abdichtender Sicherheitsbehälter das Containment des Kernkraftwerks Kalkar umgibt [,] [...] war 1976 bereits zu einem Drittel fertiggestellt, als sich die Notwendigkeit zum Übergang auf ein neues Konzept mit zäherem Stahl [...] herausstellte. Die Stahlblechhülle – Bauart gemäß deutschem Genehmigungsanspruch! – kostete fast so viel wie der [französische Experimentalbrüter, SV] Phénix [...] insgesamt.«⁹⁵

Diese Kaskade wurde historisch mehr und mehr von einer sozialen Rationalität evoziert, deren striktere Genehmigungsverfahren Ausdruck einer zunehmend kritischen Öffentlichkeit waren, anstatt einer – zumindest aus Sicht der beteiligten Forscher – wissenschaftlich-technischen Rationalität zu gehorchen. Nur folgerichtig ergab sich dadurch eine letzte hier zu nennende, nochmalige Ausweitung der Betrachtung hypothetischer Abläufe hin zum finalen Fall eines Versagens sekundärer Containment-Maßnahmen. Solche Ereignisse fielen aus der Definition eines GAUs heraus. Sie betrafen technisch nicht mehr beherrschte, d.h. nicht mehr ›annehbare‹ Unfälle – nukleare Katastrophen, bei denen radioaktive Substanzen in die Außenwelt austreten. Eine derartige technische Nichtbeherrschung war jedoch mitnichten ein Grund, nicht auch solche Katastrophenfälle computersimulatorischen Quantifizierungsversuchen zu unterziehen. Am Kernforschungszentrum Karlsruhe etwa wurde die Software MUNDO (für ›Maximale UNfall DOSis‹) entwickelt, um die radioaktive Belastung im Umkreis einer havarierten Atomanlage zu berechnen:

94 Meyer-Abich: »Die risikoanalytische Bewertung des Brüters«, in: Ders. (Hg.): *AUSgebrütet*, a.a.O., S. 124.

95 Marth: *Der Schnelle Brüter SNR 300*, a.a.O., S. 44 und S. 88.

»The calculations were carried out by means of the digital program MUNDO developed at Karlsruhe in the course of these investigations which calculates the doses around a nuclear power plant due to large accidents as function of the course of accident, of the activity distribution in the containment system following the release from the fuel, and of the meteorological dispersion in the atmosphere after leakage through the containment barriers. All the significant effects influencing the activity release as multiple containment systems, filter and air cleaning systems, plate-out behaviour, ground level or stack release can be taken into account.«⁹⁶

Mit solchen hypothetischen Überlegungen kam Anfang der 1970er in der BRD eine kontroverse Diskussion über ›Super-GAUs‹ und das ›Restrisiko‹ in Gang,⁹⁷ bei der die eingangs angesprochene Doppelbedeutung von ›annehmen‹ konfligierte: Denn wo für Kernforscher ein Super-GAU im hypothetischen Wissen ihrer Simulationen und Risikoanalysen als rechnerisch vernachlässigbar verschwand, wurde er für viele skeptische Laien zunehmend plastisch und dadurch umso weniger annehmbar. Oder, wie Ulrich Beck schreibt: »[I]n Risikodefinitionen wird das *Rationalitätsmonopol der Wissenschaften gebrochen*.«⁹⁸ Der Konflikt zwischen den Annahmen einer Hypothetizität der Kernforschung und ihrer *anzunehmenden* Unfälle auf der einen Seite, und ihrer *Annehmbarkeit* durch eine kritische Öffentlichkeit auf der anderen, schärft sich, so Beck, in dem Moment, in dem Wissenschaftler mit einem Monopolspruch auf Rationalität auftreten.

»Die Reaktorsicherheitsstudien beschränken sich auf die Schätzung bestimmter quantifizierbarer Risiken anhand wahrscheinlicher Unfälle. Die Dimensionalität des Risikos wird also vom Ansatz her bereits auf *technische Handhabbarkeit* eingeschränkt. Bei breiten Teilen der Bevölkerung steht dagegen gerade das *Katastrophenpotenzial* der Kernenergie im Zentrum. Auch eine noch so geringe Unfallwahrscheinlichkeit ist dort zu hoch, wo *ein* Unfall die Vernichtung bedeutet.«⁹⁹

Gegen eine solche soziale Rationalität tragen die hypothetischen Methoden nicht – ganz gleich, wie klein sich die Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmter Ereignisse in den Computerprogrammen und Risikoanalysetechniken der Atomforschung rechnen lassen.¹⁰⁰ Wo die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Super-GAUs größer Null ist – und sie wird, da es sich bei Brutreaktoren um komplexe technische System mit enger Kopplung handelt, irreduzibel größer Null sein – bleibt einzig, dieses Katastro-

96 Wolf Häfele u.a.: »The Principle of Double Containment and the Behavior of Aerosols in its Relation to the Safety of Reactors with a High Plutonium Inventory«, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Oktober 1967, KFK-669.

97 Vgl. Radkau: Aufstieg und Krise der deutschen Atomwirtschaft 1945–1975, a.a.O., S. 370.

98 Beck: *Risikogesellschaft*, a.a.O., S. 38 (Herv. i. Orig.).

99 Ebd., S. 39 (Herv. i. Orig.).

100 Vgl. hierzu auch das entsprechende Kapitel bei Charles Perrow und seine auf Herbert A. Simon Bezug nehmende Diskussion von absoluter, begrenzter und sozialer Rationalität: Perrow: *Normale Katastrophen*, a.a.O., S. 368–378.

phenpotenzial zu relativieren, »to put the events into perspective«.¹⁰¹ Die hypothetischen Explorationsmethoden für Bereiche technischen Nichtwissens in den Nuklearanlagen wurden quasi »nach außen« gekehrt und auf soziotechnische Gefahrenanalysen übertragen. Dazu war es u.a. wichtig, mit Programmen wie MUNDO auch die Auswirkungen eines Super-GAU's zu quantifizieren zu versuchen. Nur so ließen sich z.B. erwartbare Opferzahlen angeben, die man mit anderen gesellschaftlichen Gefährdungs- und Katastrophenpotenzialen vergleichen konnte: »In the course of the next few years, it will be the aim of such research to resolve the outstanding uncertainties so that overall risk associated with fast reactor operation can be reliably assessed. This must be done in the perspective of comparable risks associated with other technological developments and freely accepted by contemporary advanced societies.«¹⁰²

Genauere Zahlenangaben über die Winzigkeit von Unfallrisiken, so notiert Joachim Radkau, avancierten in der öffentlichen Diskussion zu beliebten Argumenten der Kernenergie-Protagonisten: »Die »reliability analysis«, die lediglich als Mittel zum Aufspüren von Schwachstellen der Kerntechnik getaugt hätte, wurde der Öffentlichkeit gegenüber in unzulässiger Weise als Beweis für die Sicherheit der Kerntechnik verwendet.«¹⁰³ Und Radkau analysiert auch den durch die Methoden und Techniken der Hypothetizität induzierten Wandel in der Reaktorsicherheitsdebatte ganz richtig als Umstellung von Empirie auf Futurologie: Befasste sich 1962 die erste Sektion der diesbezüglichen IAEA-Symposien noch »ganz punktuell-empirisch« mit einem Rückblick auf Reaktor-Störfälle, so beginnen die Sammelbände eine Dekade später vorwärtsgewandt mit Sektionen zur »Philosophy of Safety Design« und angewandter Wahrscheinlichkeitsrechnung.¹⁰⁴ Und innerhalb einer solchen auf Probabilistik beruhenden »Philosophie« kommen dann hochgradig verzerrte Vergleiche zustande, die heutzutage wieder als »funny stories« des Atomzeitalters durchgehen mögen.

Um nur ein Beispiel herauszugreifen: In einem Sammelband mit dem schönen Titel *Nuclear Energy. A Sensible Alternative* erscheint noch 1985 ein Beitrag zum Thema »Risks in our Society«, der verschiedene Risikofaktoren auf eine gemeinsame Währung der *Life Expectancy Reduction* (LER) umrechnet, also die jeweilige Reduzierung der Lebenszeit angibt. So soll eine Antwort auf die Eingangsfrage des Artikels gegeben werden: »Our news media are constantly bombarding us with scare stories about radiation, pollution, dangerous chemicals, and other products of our technology. How dangerous are these threats, and how do they compare with other

101 Avery: »Fast Reactor Safety Research Needs«, in: American Nuclear Society (Hg.): *Proceedings of the Fast Reactor Safety Meeting*, a.a.O., S. 383.

102 Teague, »Safety of Fast Reactors«, in: Frank R. Farmer (Hg.): *Nuclear Reactor Safety*, a.a.O., S. 183–210, hier S. 207.

103 Joachim Radkau und Lothar Hahn: *Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft*, München 2013, S. 362.

104 Ebd., S. 365.

risks we constantly face in our daily lives?»¹⁰⁵ Der Beitrag fasst eine ursprünglich im Journal *Health Physics* erschienene Studie zusammen, die u.a. zu dem erstaunlichen Ergebnis kommt, dass »[o]ne of the greatest risks endured by large numbers of people is remaining unmarried«, dicht gefolgt von Zigarettenrauchen, bei der für Männer eine Lebenszeitreduktion von 10 Minuten pro Zigarette kalkuliert wird.¹⁰⁶ Ein Super-GAU hingegen nehme sich demgegenüber äußerst harmlos aus:

»A nuclear meltdown has been portrayed as »the ultimate catastrophe«, but even if we had one every 5 years somewhere in the US, our LER from them would be only 0,2 day according to government-sponsored scientists, or 2 days according to nuclear critics.«¹⁰⁷

Und in der zugehörigen Überblickstabelle sortiert sich diese Gefahr damit ein zwischen Flugzeugabstürzen und jener, dass einem der Himmel auf den Kopf fällt – respektive die damals um die Erde kreisende *Skylab*-Raumstation (Abb. 8).

322 IV • Risk Assessment

TABLE I
Estimated Life Expectancy Reduction from Risks and Activities

Activity or risk	Days LER
Heart disease	2100
Being unmarried	2000
Cigarette smoking	1600
Cancer	980
Being 30 lb. overweight	900
Grade school dropout	800
Unskilled laborer	700
Stroke	520
Vietnam army duty	400
Mining or construction work (due to accidents only)	300
Motor vehicle accidents	200
Pneumonia, influenza	130
Homicide	90
Drowning	40
Poison + suffocation + asphyxiation	37
Energy production and use	25
Diet drinks	2
Hurricanes, tornadoes	1
Airline crashes	1
All-nuclear electricity	0.04–2 ^a
Harrisburg area residents (from TMI accident)	0.001
Radioactive waste burial ground leaks, risk to nearest neighbors	0.0001
Sky-Lab fall	0.0000002

^a The lower number is the estimate of government-sponsored scientists, and the higher number is the estimate of nuclear critics.

Abb. 8 Risikorelativierung von Kernkraft und anderer Hochtechnologien durch den Vergleich mit Alltagsrisiken über die Variable LER (Life Expectancy Reduction)

105 Bernard L. Cohen: »Risks in Our Society«, in: Karl O. Ott und Bernard I. Spinrad (Hg.): *Nuclear Energy. A Sensible Alternative*, New York 1985, S. 317–325, hier S. 317.

106 Vgl. ebd., S. 318.

107 Ebd., S. 320.

So überzogen dieses Beispiel auch sein mag, so eindrücklich zeigt es doch den Versuch, eine ›Verhaltenswissenschaft von Systemen‹ mit ganz anderen Verhaltensweisen zu verrechnen und dabei z.B. menschliche und nichtmenschliche Akteure über den Begriff des Risikos auf einer Stufe zu situieren, um das Katastrophenpotenzial der Kernkraft zu relativieren. Es ist ein Versuch, wissenschaftliche und soziale Rationalität zu verbinden. Denn genau darum geht es in der Kernenergie Diskussion: Wissenschaftliche und soziale Rationalität sind in Hochtechnologiegesellschaften gar nicht mehr unterscheidbar und in ihrer kontroversen Beziehung ein wichtiger Motor öffentlicher Entscheidungsprozesse – oder mit Beck gesprochen: »Wissenschaftliche ohne soziale Rationalität bleibt *leer*, soziale ohne wissenschaftliche Rationalität *blind*.«¹⁰⁸ Dass diese Dialektik im Fall des SNR-300 schließlich in einer juristischen Entscheidung synthetisiert wird, spricht dabei jedoch für sich. Im sogenannten Kalkar-Beschluss vom 8. August 1978 heißt es in Leitsatz 6:

»Vom Gesetzgeber im Hinblick auf seine Schutzpflicht eine Regelung zu fordern, die mit absoluter Sicherheit Grundrechtsgefährdungen ausschließt, die aus der Zulassung technischer Anlagen und ihrem Betrieb möglicherweise entstehen können, hieße die Grenzen menschlichen Erkenntnisvermögens verkennen und würde weithin jede staatliche Zulassung der Nutzung von Technik verbannen. Für die Gestaltung der Sozialordnung muss es insoweit bei Abschätzungen anhand praktischer Vernunft bewenden. Ungewissheiten jenseits dieser Schwelle praktischer Vernunft sind unentrinnbar und insofern als sozialadäquate Lasten von allen Bürgern zu tragen.«¹⁰⁹

Das Restrisiko als sozialadäquate Last – jenseits einer mit solchen Bestimmungen jedenfalls genehmigungsrechtlich beendeten Sicherheitsdiskussion waren es damit letztlich andere Faktoren, welche die Euphorie für weitere Forschungen an der Schnellbrütertechnologie – weltweit – beendeten. Hierzu gehörten die Gefahren der Proliferation von Plutonium und eine ökonomische Neubewertung angesichts eines seit Mitte der 1970er Jahren prognostizierten, im Vergleich zu früheren Studien drastisch zurückgefahrenen Ausbaus der Kernenergie insgesamt.

Daran vermögen auch die eingangs angesprochenen vermeintlichen Erfolgsmeldungen bezüglich signifikanter qualitativer Fortschritte bei der Computersimulation von Reaktoren und Brüter-Kernen kaum etwas zu ändern. Sie folgen einerseits wiederum nur der wissenschaftlich-ingenieurtechnischen Rationalität, und andererseits operieren auch sie nach wie vor im Bereich der Hypothesizität – ganz gleich, wie groß die Rechenkapazität des HPC oder wie ›tiefenscharf‹ die Modellierung. Hussein Khalil, der Direktor der Nuclear Engineering Division am ANL, räumt ein:

»What we hope to do with the more powerful computers [...] is actually begin the simulation at a very fundamental scale by building the model from the atomic level where the

108 Beck: *Risikogesellschaft*, a.a.O., S. 40 (Herv. i. Orig.).

109 Mitglieder des Bundesverfassungsgerichts (Hg.): *Entscheidungen des Bundesverfassungsgerichts (BVerfGE)* 49 (1978), S. 89.

interactions are taking place. Obviously, we can simulate this degree of detail only for a very small portion of the system, but the hope is that we can then make use of this information to create a less-detailed – yet valid – model for the entire system.«¹¹⁰

V. Schluss: Möglichkeitswissen

Das von Wolf Häfele entworfene Konzept einer computertechnisch gestützten Hypothetizität berührt mithin auf mehrfache Weise ein Verständnis von technischem Nichtwissen: Erstens bringen die ›mechanistischen‹ und probabilistischen Ansätze und Techniken der Schnellbrüterforschung jenes Paradox hervor, das Niklas Luhmann in seiner *Soziologie des Risikos* beschreibt:

»Je mehr man weiß, desto mehr weiß man, was man nicht weiß [...]. Je rationaler man kalkuliert und je komplexer man die Kalkulation anlegt, desto mehr Facetten kommen in den Blick, in Bezug auf die Zukunftsgewissheit und daher Risiko besteht.«¹¹¹

Die immer kleinteiligeren Berechnungsversuche und detaillierteren Modellierungen von Teilproblemen führen nicht zu mehr Eindeutigkeit und Beherrschbarkeit, sondern zu einer invers verlaufenden, immer ausgreifenderen Ausweitung der Sicherheitsthematik bis hin zu kaum mehr bestimmbareren gesellschaftlichen Risiken. Auch heute implizieren Computersimulationen von Reaktorvorgängen die Einführung von Parametrisierungen und Annahmen und unterstreichen, dass sich das Verständnis wissenschaftlicher ›Wahrheit‹ längst hin zu ›Adäquatheit‹, fallweiser ›Richtigkeit‹ oder ›Anwendbarkeit‹ verschoben hat.¹¹² Es geht darum, gesicherte Wissensbestandteile so zu arrangieren, dass damit die Bereiche des verbleibenden oder neu entstehenden Nichtwissens bewusst organisiert und eingeplant werden. Für diese Operationalisierung sind Computersimulationen und probabilistische Fehlerbaum- und Risikoanalysen die Medien der Wahl.

Zweitens können diese Nuklearforschungsprojekte als exemplarisch angesehen werden für eine Neusortierung von Faktischem und Möglichem: Wo nur mehr sehr sporadisch auf empirische Befunde zurückgegriffen werden kann, wo das *Trial and Error* von Hypothesenbildungen und Vergleichsdatengenerierung, wo die (Un-)Planbarkeiten von Experimentalsystemen (gemäß Rheinberger) zunehmend geringeren Einfluss haben, wird früh auf numerische Verfahren, Simulationsmodelle und

110 Vgl. Argonne National Laboratory (Hg.): »Computer simulations help design new nuclear reactors«, in: *Argonne Now*, Spring 2008, http://www.ne.anl.gov/About/headlines/new_nuclear_age.shtml (aufgerufen: 23.2.2016).

111 Niklas Luhmann: *Soziologie des Risikos*, Berlin 1991, S. 37. Vgl. für eine eingehende Analyse von ›Nichtwissen‹ Andreas Kaminski: *Technik als Erwartung. Grundzüge einer allgemeinen Technikphilosophie*, Bielefeld 2010, S. 227–242.

112 Vgl. Claus Pias: »On the Epistemology of Computer Simulations«, in: *Zeitschrift für Medien- und Kulturforschung* 1 (2011), S. 29–54.

Fehlerbäume gesetzt. Damit werden Ereignisfolgen in ihrer Dynamik erfassbar, deren Erforschung anderweitig nicht mehr denkbar ist: Realweltexperimente einer Brüter-Kernschmelze wären ethisch kaum verantwortbar und eine sinnvolle Datengenerierung dabei mehr als fragwürdig – welche Instrumentierung hielte überhaupt den involvierten Temperaturen und Drücken stand? Diese Ereignisfolgen lösen sich von einem Erfahrungshorizont mit Vergangenheitsbezug und eröffnen Erwartungshorizonte.¹¹³ Folglich sind nukleare Störfälle weniger jene Kurzschlüsse von Ereignis und Beschreibung, welche »die Nachträglichkeit der (epistemologischen, performativen und ästhetischen) Mustererkennung mit der Notwendigkeit weiterbearbeiten der Zukunftsorientierung«¹¹⁴ zusammenführen, wie Lars Koch und Christer Petersen schreiben. Sie operieren vielmehr von vorneherein zukunftsgerichtet: Als Modellexperimente, Simulationen und Entscheidungsbäume, die den Störfall mitsamt hinreichender Lösungsszenarien – mit einem Wort Hans Blumenbergs – »vorahmen« und somit Störung und Entstörung intrinsisch koppeln.¹¹⁵ Der Störfall, ehemals ein Moment der Latenz und Dehnung, der retrospektiv betrachtet als handlungsleitend für zukünftige Erwartungshorizonte umformatiert werden könne, transformiert sich zu einem »Immer schon Dagewesenen«, das den Anfang jedweder Planung markiert. Nicht aus seinem Eintreten wird gelernt, sondern aus der Operationalisierung seines Nichteintretens.¹¹⁶

Diese Umstellung auf ein hypothetisches Wissen, auf ein Möglichkeitswissen, ist *drittens* induziert von einem Komplexitätszuwachs. Charles Perrow zufolge stellen die äußerst vielteiligen Nuklearanlagen mit ihren multiplen Elementen Systeme mit *enger Kopplung* dar. Enge Kopplung bedeutet, dass es aufgrund der Sicherstellung der Funktionsweise der Technologie mannigfache exakt miteinander abzustimmende Prozesse vorauszuplanen gilt. Denn die mögliche Vielfalt und Geschwindigkeit von radioaktiven Prozessen lässt nur sehr begrenzt Raum für Eingriffe oder »Umleitungen« von Störpotenzialen. Sicherungsmaßnahmen erfordern damit immer auch schon ein Möglichkeitswissen potenzieller Stör- und Unfälle, die simulativ durchgespielt und in der Auslegung und im Bau der Anlage umgesetzt werden. Wo *in realiter* kein Spielraum bleibt, so Eva Horn, »müssen Systeme also besonders exakt durchdacht werden: alle potentiellen Störungen, alle Ausfälle und ihre Konsequenzen inklusive der möglichen Kombinationen mehrerer Fehlerquellen, müssen im Voraus bereits

113 Vgl. Reinhard Koselleck: *Vergangene Zukunft. Zur Semantik geschichtlicher Zeiten*, Frankfurt/M. 1979, S. 349–375.

114 Lars Koch und Christer Petersen: »Störfälle – Fluchtlinien einer Wissensfigur«, in: Dies. und Joseph Vogl (Hg.): *Störfälle*, S. 7–12, hier S. 9.

115 Vgl. Hans Blumenberg: »Nachahmung der Natur«. Zur Vorgeschichte der Idee des schöpferischen Menschen«, in: Ders.: *Wirklichkeiten in denen wir leben. Aufsätze und eine Rede*, Stuttgart 1986, S. 55–103.

116 Vgl. hierzu Sebastian Vehlken u.a.: »Computersimulation«, in: Benjamin Bühler und Stefan Willer (Hg.): *Futurologien. Ordnungen des Zukunftswissens*, München 2016, S. 181–196.

mit eingeplant werden«. ¹¹⁷ Dieses Vorgehen hat jedoch zumindest zwei Schwachstellen: Es erhöht zum einen wiederum die Komplexität des Systems und führt zu neuen möglichen und möglicherweise unbedacht bleibenden Kopplungen. Und zum anderen geht es von einer Ursache-Wirkungs-Logik aus, in der ein fehlerhaftes Element immer zu identifizieren sein wird.

Und der *vierte* Punkt ist schließlich die kaskadenartige Ausdehnung des hypothetischen Wissens. Vom *Bounding Accident* über HCDA-Simulationen zu Containment-Maßnahmen und der Berechnung von Effekten eines Super-GAU hin zur Relativierung von Unfallrisiken: Die Techniken und Methoden der Kernkraftforschung weiten sich im Laufe der 1970er Jahre zu Konstituenten der ›Risikogesellschaft‹ (Beck) aus. Ihre (computer-)modellierten Störfälle changieren zwischen Wirklichkeits- und Möglichkeitssinn: Sie verweisen einerseits auf die Verletzlichkeit moderner Gesellschaften, dienen andererseits aber auch der Abwiegung von Gefahren. Störfälle sind damit Produkte technischer Operationen, die ein futurologisches Wissen erst erzeugen. Dies gilt prinzipiell für jede Art von Technologie, stellt sich angesichts möglicher Folgen nuklearer Störfälle anhand von Atomanlagen jedoch mit unvergleichlicher Radikalität und Dringlichkeit dar. Und d.h. auch, dass die Techniken dieser Futurologie besonderen Anforderungen unterliegen und Gegenstand heftiger öffentlicher Debatten um ›akzeptable‹ Restrisiken werden. Doch auf die Frage, wie solche Risikoeinschätzungen dann gesellschaftlich bewertet werden, hat auch eine computertechnisch noch so hochgerüstete Hypothesizität der Kernforschung keine Antwort.

117 Eva Horn: »Die Zukunft der Dinge. Imaginationen von Unfall und Sicherheit, in: *Behemoth. A Journal on Civilisation* 4 (2011), Heft 2, S. 26–57, hier S. 44.

