Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

# 17. GRS-Fachgespräch

Tagungsbericht

GRS - 110

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

# 17. GRS-Fachgespräch

Tagungsbericht

Köln
6. und 7. Oktober 1993

Juni 1994

GRS - 110
ISBN 3-923875-60-6

**Layout und dtp:**
G. Berberich

**KEY WORDS**
Digitale Informationstechnik, Deterministik, Chemie, Forschung, Kernkraftwerke, Sicherheit, Störfall, Unfall

## Inhalt


Grußwort von Dr. Gebhard Ziller
Staatssekretär im Bundesministerium für Forschung
und Technologie 1

Das Schutzzielkonzept - ein Vorschlag für die deterministische Sicherheitsbewertung bei der periodischen Sicherheitsüberprüfung von Kernkraftwerken
*M. Mertins, D. Rittig* 7

Die neue Generation der Informationsstechnik - Sicherheitsgewinn beim Einsatz in Kernkraftwerken
*W. Bastl* 27

Einbeziehung schwerer Störfälle in die Auslegung des Sicherheitseinschlusses neuer Reaktoren
*K. Wolfert, J. Rohde* 43

Forschung in Deutschland - ein Diskussionsbeitrag aus der chemischen Industrie
*U.H. Felcht* 57

Autoren 73

## Grußwort von Dr. Gebhard Ziller

**Staatsekretär im Bundesministerium für Forschung und Technologie**

Es ist gute Tradition der GRS-Fachgespräche, Fachleute unterschiedlichster Disziplinen, unterschiedliche Verantwortungsbereiche und politisch Verantwortliche zusammenzubringen, um aktuelle Fragen der kerntechnischen Sicherheit zu diskutieren.

Wie ich feststellen konnte, hat das GRS-Fachgespräch auch im Ausland zunehmende Aufmerksamkeit erfahren. Die große Zahl von Gästen aus vielen Ländern bei dieser Veranstaltung stellt dies erneut unter Beweis.

Die heutige Wirtschaftlage erfordert weltweit besondere Anstrengungen. Für die Bundesrepublik Deutschland zeigt sich, daß gerade Industriesektoren, die die Stärke Deutschlands ausmachen, auf dem Weltmarkt unter zunehmenden Druck der Niedriglohnländer einerseits und der Hochtechnologiestaaten andererseits geraten. Die Zukunftssicherung des Forschungs- und Industriestandortes Deutschland hat deshalb eine zentrale Bedeutung in der Politik erhalten.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Zukunftssicherung ist der Erhalt und die Stärkung unserer Forschung. Dazu gehört zunächst eine bessere Akzeptanz von Wissenschaft und Technik: Die deutsche Bevölkerung muß wieder begreifen, welche hervorragende Chancen ein innovationsfreudiges Klima für die Sicherung von Wohlstand und Arbeitsplätzen und für die Finanzierung der sozialen Sicherheit auf hohen Niveau bietet. Hinzu kommt, daß Innovationen nicht durch Aufblähung der Bürokratie, durch Überregulierung oder gar durch parteipolitisch-ideologische Hürden behindert werden dürfen. Im Energiebereich ist aus der täglichen Erfahrung mit solchen Behinderungen inzwischen schon der Eindruck entstanden, daß nicht nur innovative Forschung undurchführbar werde, sondern auch die Rahmenbedingungen für eine verläßliche Energiepolitik und für eine Versorgung mit preisgünstiger Energie nicht mehr gegeben seien.

Forschung, Entwicklung und Innovation erfordern besonders im Energiebereich lange Zeiträume. Sie verlieren ohne gesicherte politische und gesellschaftliche Akzeptanz und ohne ausreichende Sicherheit für Erprobung und Einsatz ihre Planungs- und Kalkulationsgrundlage. Auch verlieren deutsche Unternehmen ihre Exportmärkte, wenn ihre Produkte im eigenen Lande keine Anwendung finden, und wenn nicht auf diese Weise das Vertrauen in die eigene Entwicklung demonstrativ unter Beweis gestellt wird. Das gilt beispielsweise für den Transrapid; es gilt für gentechnologische Produktionen und Produkte; es gilt nicht zuletzt für die Nukleartechnik, ob wir fortschrittliche Reaktorlinien betrachten oder Mox-Brennelemente.

Die bereits seit Monaten geführte Diskussion um einen Konsens in der Energiepolitik hat die kontroversen Positionen der politischen Lager deutlich gemacht. Es läßt sich jedoch heute nicht sagen, wo ein parteiübergreifender Konsens liegen könnte, zumal die SPD in dieser Frage ganz offensichtlich mit verschiedenen Zungen spricht. Hinzu kommt, daß auch die Haltung der Elektrizitätsversorgungsunternehmen noch uneinheitlich ist. Die Bundesregie-

rung hat ihre Position bereits klar definiert und sich dabei auf das Notwendige beschränkt. Es ist offensichtlich, daß die Energieversorgung auf Kernenergie angewiesen ist, wenn sie gleichzeitig am Ziel einer deutlichen $CO_2$-Reduzierung festhalten will. Regenerative Energiesysteme können auf absehbare Zeit ihren Anteil an der Energieversorgung nicht dramatisch steigern. Ebensowenig wäre eine Übernahme des Kernenergieanteils durch fossile Energieträger zu rechtfertigen. Eine Energieversorgung, die nur auf dem Prinzip Hoffnung begründet ist (z.B. überzogene Energieeinsparerwartungen oder unrealistische Annahmen über Steigerungsraten bei den erneuerbaren Energien) darf es im Interesse des Standortes Deutschland nicht geben.

Wie Sie wissen, leistet die Stromversorgung aus Kernenergie in Deutschland einen Beitrag zur öffentlichen Versorgung von derzeit mehr als etwa 30 %. In anderen europäischen Ländern, in denen Kernenergie genutzt wird, ist der Beitrag noch erheblich höher. Die Kernenergie ist auch für die zukünftige Energieversorgung in Europa von erheblicher Bedeutung. Die Weiterentwicklung der Kraftwerke wird von uns als Aufgabe von Wirtschaft und Industrie angesehen. Die Bundesregierung sieht ihre Verantwortung in der Erfüllung der staatlichen Vorsorgepflicht, die den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Nutzung der Kernenergie nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zu gewährleisten hat. Das Forschungsprogramm Reaktorsicherheit des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) bildet die Grundlage für diese Sicherheitsvorsorge soweit Forschung und Technologie angesprochen sind.

Übergeordnetes Ziel der Reaktorsicherheitsforschung ist es, durch vorausschauende Forschung mögliche Sicherheitsprobleme weit im Vorfeld von Gefährdungen zu erkennen. Dabei geht es sowohl um Fragestellungen aus dem Betrieb der Kernkraftwerke als auch um Bereitstellung von Analysewerkzeugen für die Bewertung der Sicherheit heutiger und vor allem künftiger Anlagen. Darüber hinaus ergeben sich aus der Reaktorsicherheitsforschung wichtige Anstöße für eine Verbesserung der Sicherheit bei der Weiterentwicklung der Kerntechnik durch die Industrie.

Die Wirksamkeit der Reaktorsicherheitsforschung hängt wesentlich davon ab, daß diese unabhängig von Industrie- und Verbandsinteressen durchgeführt wird. Die technisch-wissenschaftlichen Anforderungen an diese Forschung entsprechen nicht immer den betrieblichen Zielen und damit der industrieorientierten Denkweise. Die Transparenz, Nachprüfbarkeit und unabhängige Ausgangssituation in den Fragestellungen der Forschung zur sicherheitstechnischen Bewertung müssen für alle Stellen, die es angeht, stets gegeben sein.

Eine wichtige Aufgabe der Reaktorsicherheitsforschung liegt in der Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik. Sie bietet die Möglichkeit, bisher nicht erkannte Schwachstellen aufzufinden und zu beseitigen. Zugleich wird das Verständnis des Betriebsverhaltens der komplexen Reaktorsysteme auch in schwierigen Situationen erhöht und die Basis für eine Verbesserung der Störfallverhinderung und der Störfallbeherrschung sowohl durch Verbesserungen in der Konstruktion wie in der Betriebsweise gelegt.

Mir erscheint es recht und billig, daß die Betreiber von Kernkraftwerken auch zur Energieforschung einen substantiellen, finanziellen Beitrag leisten. Die Gespräche, die das BMFT mit

den Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) zu dieser Frage aufgenommen hat, haben bis jetzt noch zu keinem befriedigenden Ergebnis geführt. Ich sage auch hier, daß ich es für erforderlich halte, daß sich die EVU stärker und sichtbarer als bisher in Arbeitsteilung mit dem Staat in der Energieforschung engagieren. Der Umstand, daß die finanzielle Unterstützung von F+E-Arbeiten durch die Kraftwerksbetreiber sehr zu wünschen übrig läßt, beeinträchtigt auch das Engagement der Politik und der staatlichen Förderseite in der Nukleartechnik.

Wenn auch für die Reaktorsicherheitsforschung die Haushaltsmittel knapper werden, erfordert dies eine erneute Prioritätensetzung für die Forschungsarbeiten und eine Intensivierung der internationalen Zusammenarbeit im Sinne der Arbeitsteilung und konzertierter Aktionen. Dabei muß jedoch gewährleistet sein, daß der Stellenwert des deutschen Standpunktes in der internationalen Sicherheitsdiskussion erhalten bleibt. Hier sind die Wissenschaftler in hohem Maße gefordert, und der GRS als einer integrierenden Institution kommt eine besondere Verantwortung zu.

Die Arbeiten im deutschen Forschungsprogramm Reaktorsicherheit haben entscheidend zum international anerkannt hohen Sicherheitsniveau der heute in Deutschland betriebenen Kernkraftwerke beigetragen. Dabei hat die breit angelegte Forschungskooperation mit den westlichen Industriestaaten wesentlichen Anteil an dem heutigen Stand der Sicherheitskultur. Fragen der Sicherheit von Reaktoren stehen auch im Mittelpunkt der EG-Forschungsprogrammme. Die Bundesregierung hat sich vor diesem Hintergrund bereits frühzeitig für eine Intensivierung der von der Kommission geförderten Untersuchungen zur Reaktorsicherheit eingesetzt und eine substantielle Erhöhung der im 4. Rahmenprogramm hierfür bereitgestellten Fördermittel empfohlen.

Der BMFT wirkt aktiv an der Definition der EG-Forschungsziele mit. Deutsche Forschungsinstitutionen sind an der Umsetzung beteiligt. Darüber hinaus bieten die EG-Forschungsprogramme eine ausgezeichnete Plattform für den Austausch von Kenntnissen zwischen den einzelnen Mitgliedsstaaten. Dies trägt dazu bei, das vorhandene technische Wissen optimal zu nutzen und die Harmonisierung in Sicherheitsfragen voranzutreiben.

Gerade in den letzten Tagen ist uns allen wieder deutlich geworden, daß die politischen Veränderungen in der Sowjetunion und in den Staaten Mittel- und Osteuropas für den Rest der Welt und nicht zuletzt für Deutschland eine besondere Herausforderung darstellen. Die überwiegende Zahl dieser Staaten betreiben Kernkraftwerke. Daraus folgt, daß neben vielen anderen Fragen auch der Sicherheitsstandard dieser Anlagen besonders für das "Nachbarland" Deutschland von essentieller Bedeutung ist. Die Bundesregierung hat daher mit den Nachbarstaaten in Ost und West Informations- und Kooperationsabkommen zur kerntechnischen Sicherheit geschlossen. Sie ist darüberhinaus auch an den Arbeiten der multinationalen Organisationen und Gremien zur Gewährleistung und Erhöhung der kerntechnischen Sicherheit maßgeblich beteiligt.

Aufgrund des Sicherheitsstandards deutscher Kernkraftwerke und der weltweit anerkannten Expertise in der Forschung zur Reaktorsicherheit hat die Bundesrepublik Deutschland wesentlichen Einfluß auf die Formulierung von Zielen und Inhalten internationaler Sicherheitsstandards nehmen können.

Die Glaubwürdigkeit und das Gewicht fachlicher Expertise deutscher Sicherheitsfachleute und Wissenschaftler wird in internationalen Gremien auch künftig nur dann Bestand haben, wenn sie sich auf eigenständig erarbeitete Ergebnisse gründen, die den deutschen Fachleuten eine wissenschaftlich solide Grundlage für ihre Arbeit in bi- und multilateralen Gremien liefern.

In der internationalen Fachsiskussion über die Sicherheit sowjetischer Reaktoren war der Sachverstand der deutschen Forschung von sowjetischen Forschungseinrichtungen schon frühzeitig anerkannt und erwünscht.

Bereits 1987 hat der BMFT ein Ressortabkommen zur wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit (WTZ) mit der damaligen Sowjetunion abgeschlossen. In diesem Abkommen hat die Reaktorsicherheit einen besonderen Stellenwert. Es folgten WTZ-Verträge mit Polen, Ungarn, der Tschechoslowakei, mit Rumänien und Bulgarien.

An dieser Stelle sei daran erinnert, daß es die feste Absicht der Neuen Unabhängigen Staaten (NUS) und der Mittel- und Osteuropäischen Länder (MOEL) ist, die Nutzung der Kernenergie zu stabilisieren und auszubauen. Dabei konzentrieren sich diese Länder zunächst auf die Rekonstruktion der in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke, so daß diese möglichst mit der projektierten Lebensdauer im Betrieb bleiben können. Eine Rekonstruktion und Modernisierung der Kernkraftwerke ist notwendig, um die Sicherheit auf ein höchstmögliches Niveau zu bringen, wie es in der IAEO empfohlen wird.

Mit der Kooperation auf dem Gebiet der Reaktorsicherheitsforschung zu Reaktoren sowjetischer Bauart will der BMFT einen Beitrag zur

- Verbesserung und langfristigen Stabilisierung der Sicherheit,
- Stärkung der Fachkapazität und
- Entwicklung einer Sichheitskultur

leisten. Dann erhöhte Sicherheit in den Ländern des ehemaligen COMECON bedeutet auch für uns höhere Sicherheit.

Dies soll durch offene und partnerschaftliche Zusammenarbeit geschehen.

Die Durchführung der konkreten Kooperationen wurde nach der deutschen Einigung erheblich erleichtert durch die ausgezeichneten Anlagenkenntnisse und Erfahrungen ostdeutscher Experten. Die russischen Sprachkenntnisse der ostdeutschen Wissenschaftler sind von hohem Nutzen.

Nachdem die Forschungseinrichtungen der neuen Bundesländer inzwischen in Struktur und Aufgaben der deutschen Reaktorsicherheitsforschung voll integriert sind, sind sie auch in die gemeinsamen Kooperationsprojekte Deutschlands mit den mittel- und osteuropäischen Ländern (MOEL) sowie den Neuen Unabhängigen Staaten (NUS) eingebunden.

Von Deutschland wird erwartet, daß es auch auf dem Gebiet der Raktorsicherheitsforschung seine Brückenfunktion zwischen Ost und West wahrnimmt und seine Kenntnisse und Erfahrungen den Partnerländern zur Verfügung stellt.

Die Fragestellungen der östlichen Partnerländer sind aufgrund der Gleichartigkeit ihrer Reaktoren weitgehen identisch. Sehr positiv aufgenommen wurde daher die Anregung des Bundesministers für Forschung und Technologie, diese Fragestellungen in gemeinsamen Aktionen anzugehen, um die begrenzten fachlichen und finanziellen Ressourcen möglichst effektiv zu nutzen. Die GRS hat inzwischen zwei multilaterale Symposien durchgeführt, die zur Vereinbarung gemeinsam definierter "concerted actions" geführt haben. An diesen gemeinsamen Arbeiten wirken auch Frankreich und Finnland mit. Wichtige Einzelaktivitäten wurden in die OECD-NEA eingebracht und werden mit deren Unterstützung in einem breiteren internationalen Rahmen fortgeführt.

Als flankierende Maßnahmen zur wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit führt der BMFT ein Unterstützungsprogramm zur direkten Hilfe für Forschungseinrichtungen der NUS durch. Mit diesen Finanzhilfen wird dazu beitgetragen, daß WTZ-Arbeiten trotz der wirtschaflichen Probleme der Parnerländer weitergeführt werden können.

Durch partnerschaftliche Zusammenarbeit wird zugleich eine gemeinsame Zusammenarbeit sowie eine gemeinsame Vertrauensbasis geschaffen, die unschätzbaren Wert erhält, wenn es um weitergehende Abkommen von politischer Relevanz geht. Ich denke da besonders an die Bemühungen, einzelne Mitgliedsländer der ehemaligen Sowjetunion von der Notwendigkeit zu überzeugen, sich dem IAEO safeguards-regime zu unterwerfen, beziehungsweise den Nichtverbreitungsvertrag als nicht Kernwaffenstaaten zu unterzeichnen.

Lassen Sie mich zum Schluß noch einmal die wichtigsten Aspekte betonen:

- Für die Zukunftssicherung des Standortes Deutschland ist eine verläßliche Energieversorgung notwendige Voraussetzung. Wenn Deutschland hier keine langfristig orientierten und tragfähigen Konzepte verfolgt, sind auf Dauer wesentliche Standortnachteile absehbar. Unter Berücksichtigung der Umweltanforderungen und im Bemühen um einen ausgewogenen Energie-Mix spielt die Kernenergie eine unverzichtbare Rolle.
- Die inernationale Dimension der Reaktorsicherheit ist evident. Reaktorsicherheitsforschung muß daher in Zukunft noch weit stärker als früher in internationaler Kooperation durchgeführt werden, wobei aber auch die Zusammenarbeit sowohl mit den Ländern Mittel- und Osteuropas und den Neuen Unabhängigen Staaten als auch mit den westlichen Ländern intensiv fortzuführen ist.
- Eine eigenständige und unabhängige Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland ist unverzichtbar, um die Expertise und Glaubwürdigkeit unserer Fachleute und damit auch den Stellenwert des deutschen Standpunktes in der internationalen Sicherheitsdiskussion zu erhalten.

Ich wünsche dem Fachgespräch einen guten und erfolgreichen Verlauf, der GRS als Trägerorganisation weiterhin eine gut Arbeit.

# Das Schutzzielkonzept - ein Vorschlag für die deterministische Sicherheitsbewertung bei der periodischen Sicherheitsüberprüfung von Kernkraftwerken

**M. Mertins, D. Rittig**

## 1. Einführung

Sicherheitstechnische Fragestellungen bei KKW beziehen sich in der Bundesrepublik eigentlich nur noch auf Einzelaktivitäten. Ganzheitliche sicherheitstechnische Zusammenhänge treten immer mehr in den Hintergrund. Denn Sicherheitsfragen betreffen das Betriebsgeschehen der bestehenden KKW und stellen sich vor allem bei einzelnen

- Wiederkehrenden Prüfungen,
- Instandsetzungsarbeiten und Änderungen,
- gemeldeten Ereignissen und
- einzelnen Erkenntnissen aus Sicherheitsanalysen sowie aus der Forschung und Entwicklung.

Alle sicherheitsrelevanten Einzelaktivitäten werden zwar fachlich intensiv behandelt, aber sie werden größtenteils isoliert betrachtet. Deshalb erscheint es angebracht, sicherheitstechnischen Zusammenhängen wieder mehr Bedeutung beizumessen.

Die periodische Sicherheitsüberprüfung (PSÜ) ist als übergreifende Sicherheitsbeurteilung gedacht. Durch sie sollen die durchgeführten Einzelaktivitäten zum Betrieb konzeptionell integriert werden.

Mit der PSÜ sind oft gestellte Fragen verbunden. Inhaltlich betreffen diese vor allem:

- die konkrete sicherheitstechnische Notwendigkeit der PSÜ,
- die Methodik der PSÜ sowie
- die anzulegenden Bewertungsmaßstäbe.

Auf die ersten beiden Fragenkomplexe soll hier nur soweit eingegangen werden, wie es zum Verständnis des eigentlichen Themas erforderlich ist. Dies betrifft die zuletzt genannten sicherheitstechnischen Bewertungsmaßstäbe der PSÜ. Mit dem hier vorgestellten Schutzzielkonzept wird versucht, eine geschlossene inhaltliche Antwort zum letzten Fragenkomplex zu geben.

Damit ist der Gesamtumfang der sicherheitsrelevanten Grundlagen der bestehenden KKW angesprochen. Diese Grundlagen sind nicht nur komplex und vielschichtig, sondern auch durch zahlreiche fachspezifische Einzelheiten geprägt.

Dies erfordert auch für das Schutzzielkonzept eine detailliertere Darstellung. Im folgenden wird aber nicht auf Einzelheiten eingegangen werden, sondern die Struktur des Schutzzielkonzepts und die Überlegungen, die dazu geführt haben, erläutert.

Das vorgestellte Schutzzielkonzept stellt zunächst nichts umwälzend Neues dar. Dies ist auch nicht zu erwarten, da es sich auf die bestehenden KKW bezieht. **Neu** ist aber die

- ❑ konsistente Geschlossenheit,
- ❑ durchgehende Ausführungsunabhängigkeit,
- ❑ differenzierte Staffelung und
- ❑ spezifizierte probabilistische Begrenzung.

Bild 1 gibt eine Übersicht über die behandelten Punkte. Dabei werden die Darstellungen ausschließlich auf inhaltliche Zusammenhänge beschränkt. Fragen der Abwicklung und genehmigungstechnischen Einordnung, wie sie derzeit diskutiert werden, bleiben außer Betracht.

**Übersicht über die behandelten Punkte**

- ❑ Inhaltliche Einordnung und vorgesehene Methodik der periodischen Sicherheitsüberwachung (PSÜ)
- ❑ Grundsätzliche Gesichtspunkte für dienen Bewertungsmaßstab der PSÜ
- ❑ Grundstruktur des Schutzzielkonzeptes
- ❑ Struktur der im Schutzzielkonzept
  - ○ zu berücksichtigenden Ereignisse bzw. Zustände
  - ○ einzuhaltenden sicherheitstechnischen Grundsätze
- ❑ Struktur der Nachweisführung im Schutzzielkonzept
- ❑ Zusammenfassung

Bild 1: Übersicht über die behandelten Punkte

Ein Bewertungsmaßstab der PSÜ kann nur richtig verstanden werden, wenn er auch richtig eingeordnet wird. Deshalb werden zunächst die inhaltliche Einordnung und die vorgesehene Methodik der PSÜ vorgestellt und daraus einige grundsätzliche Gesichtspunkte abgeleitet, die von einem Bewertungsmaßstab der PSÜ zu erfüllen sind. Anschließend wird die Grundstruktur des Schutzzielkonzepts erläutert. Hierbei spielen zu berücksichtigende Ereignisse bzw. Zustände sowie dafür einzuhaltende sicherheitstechnische Grundsätze eine wichtige Rolle. Auch die Nachweisführung wird betrachtet.

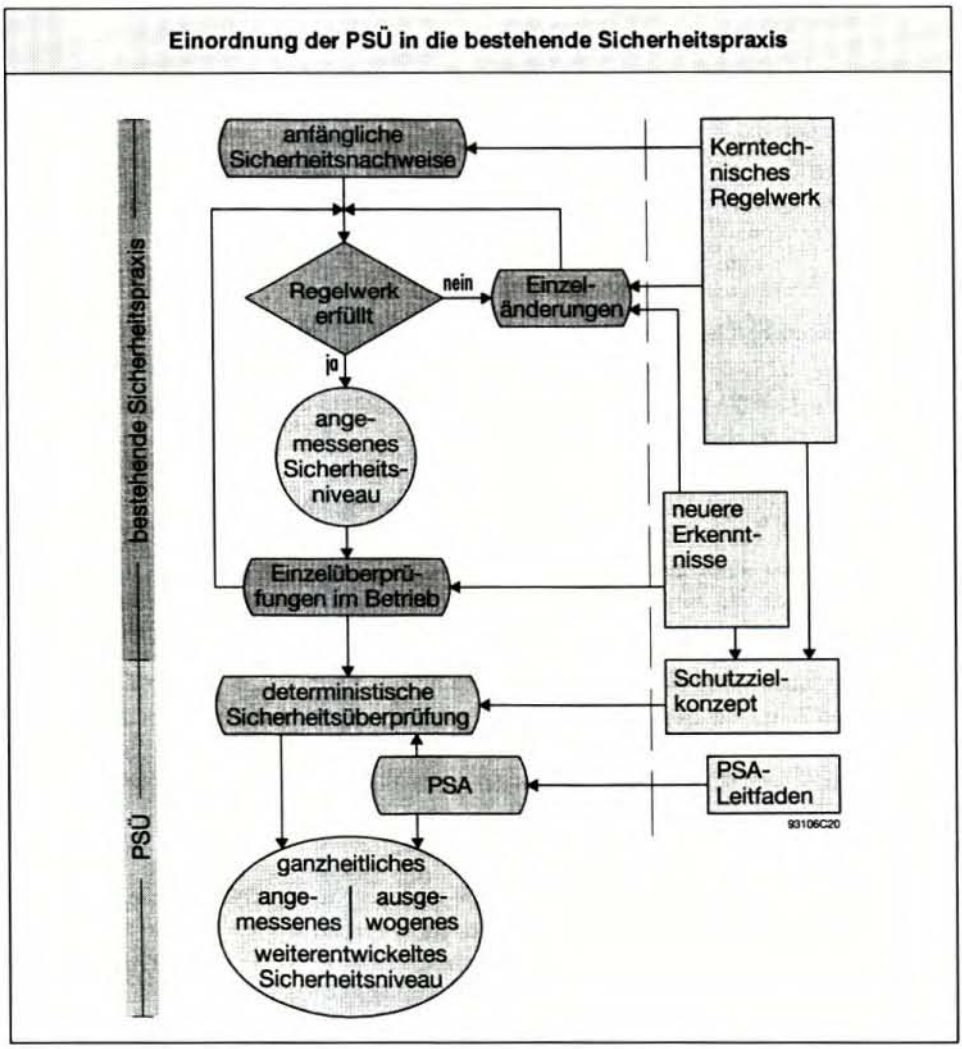



Bild 2: Einordnung der PSÜ in die bestehende Sicherheitspraxis

## 2. Inhaltliche Einordnung und Methodik der PSÜ

Wie läßt sich nun die PSÜ inhaltlich in die bestehende Sicherheitspraxis einordnen und welche Methodik bietet sich für die PSÜ an?

Der obere Teil des Bildes betrifft die bestehende Sicherheitspraxis. Gegenstand dabei sind KKW, die auch im internationalen Vergleich einen hohen Sicherheitsstand haben. Wesentliche Kriterien dafür sind

- das anfängliche Sicherheitsniveau und
- die Erhaltung dieses Sicherheitsniveaus bzw. dessen dynamische Weiterentwicklung.

Das anfängliche Sicherheitsniveau wurde durch hohe Anforderungen an die Qualität der Auslegung, Herstellung, Errichtung und Inbetriebnahme erreicht vorgeschrieben in dem "Kerntechnischen Regelwerk". Die anfängliche Angemessenheit des Sicherheitsniveaus wurde im Rahmen der Genehmigung nachgewiesen. Die Erhaltung und Weiterentwicklung erfolgt im Betrieb durch Einzelüberprüfungen im Rahmen

- der Eigenverantwortung des Betreibers und
- der behördlichen Aufsicht.

Die Erfahrung zeigt, daß im Laufe des Betriebs der KKW zahlreiche Änderungen durchgeführt werden. Diese Einzeländerungen haben vielschichtige Anlässe, auf die nicht weiter eingegangen werden soll. Vor der Durchführung wird in jedem Einzelfall überprüft, welchen Einfluß die Änderungen auf das Sicherheitsniveau haben und ob sie damit verträglich sind. Aufgrund der zahlreichen Änderungen werden die Anlagen in ihrem Gesamtverhalten mit der Zeit aber komplexer. Dazu trägt auch bei, daß mit den Änderungen teilweise ältere Technik gegen neue ausgetauscht wird. Eine zusätzliche sicherheitstechnische Bilanzierung von Zeit zu Zeit könnte zeigen, ob die Angemessenheit des Sicherheitsniveaus auch ganzheitlich noch gegeben ist.

Es gibt aber auch noch eine weitere Begründung für einen ganzheitlichen Überblick in regelmäßigen Zeitabständen. Im Rahmen der Genehmigung und Aufsicht werden sogenannte "deterministische Sicherheitsnachweise" geführt. Grundlagen dafür bilden die Vorgaben des kerntechnischen Regelwerks. Sie bestimmen in der bestehenden Sicherheitspraxis die Angemessenheit des Sicherheitsniveaus, das bei den KKW durch Genehmigung und Aufsicht erreicht wird.

Für verschiedene bestehende KKW wurden aber auch probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) durchgeführt. Trotz angemessenem Sicherheitsniveau wiesen die PSA jeweils auf zahlreiche sicherheitstechnische Verbesserungsmöglichkeiten hin. Dadurch wurde eine bessere technische Ausgewogenheit des Sicherheitsniveaus erreicht. In dieser Hinsicht hat sich die PSA auch als effektive und anwendungsreife Methodik erwiesen.

Wie die Erfahrung zeigt, hat sich zwar die bestehende Sicherheitspraxis bewährt. Es gibt jedoch auch begründete Ansätze, die Praxis weiterzuentwickeln und durch eine ganzheitliche Überprüfung zu ergänzen. Deshalb soll die PSÜ in Abständen von 10 Jahren für die einzelnen KKW durchgeführt werden und eine deterministisch orientierte Überprüfung umfassen, die durch eine PSA ergänzt wird. Mit der sogenannten "deterministischen Sicherheitsüberprüfung" soll im "klassischen" Sinne die ganzheitliche Angemessenheit des erreichten Sicherheitsniveaus beurteilt werden; mit der PSA dessen ganzheitliche technische Ausgewogenheit.

Die PSÜ soll für alle bestehenden KKW einheitlich sein. Dies erfordert ein einheitliches Vorgehen sowohl bei der deterministischen Überprüfung wie auch bei der PSA. Für die PSA

könnte dies durch Anlehnung an den sogenannten "PSA-Leitfaden" erfolgen, auf den hier nicht weiter eingegangen werden soll. Ein einheitliches inhaltliches Vorgehen bei der deterministischen Überprüfung erfordert einen Bewertungsmaßstab mit einheitlichen sicherheitstechnischen Vorgaben. Dieser Maßstab müßte aber einigen grundsätzlichen Gesichtspunkten Rechnung tragen.

| **Grundsätzliche Gesichtspunkte für einen sicherheitstechnischen Bewertungsmaßstab der PSÜ** |
|---|
| ❑ Einbeziehung sicherheitstechnischer Erfahrung und neuerer sicherheitsrelevanter Erkenntnisse |
| ❑ Unabhängigkeit von der Ausführung einzelner technischer Einrichtungen |
| ❑ Anwendbarkeit auf KKW mit breiter sicherheitstechnischer Entwicklungsgeschichte |

Bild 3: Grundsätzliche Gesichtspunkte für einen sicherheitstechnischen Bewertungsmaßstab der PSÜ

## 3. Grundsätzliche Gesichtspunkte für einen einheitlichen Bewertungsmaßstab zur PSÜ

Ein einheitlicher Bewertungsmaßstab müßte alle Gesichtspunkte berücksichtigen, die nach derzeitigen Erkenntnissen für die Angemessenheit des Sicherheitsniveaus von Bedeutung sind:

Dazu gehören die vorhandene Erfahrung und neuere sicherheitsrelevante Erkenntnisse. Darüber hinaus sollte sich der Bewertungsmaßstab nur auf Anforderungen abstützen, die unabhängig von der Ausführung einzelner technischer Einrichtungen sind. Die Ausführung wird bestimmt durch die zum entsprechenden Zeitpunkt genutzten technischen Möglichkeiten. Die bestehenden Kernkraftwerke umfassen aber einen Inbetriebnahmezeitraum von Ende 1968 bis Anfang 1989. Dementsprechend unterscheiden sich auch die sicherheitstechnischen Vorkehrungen.

Ein einheitlicher Bewertungsmaßstab müßte jedoch auch berücksichtigen, daß die bestehenden KKW eine sicherheitstechnische Weiterentwicklung von mehr als 30 Jahren repräsentieren. Ebenfalls ist einzubeziehen, daß sich in diesem Zeitraum die Sicherheit schwerpunktmäßig mit der Erfahrung und vor allem im Zusammenhang mit dem Neubau von Anlagen entwickelt hat. Ein praxisnaher Bewertungsmaßstab für die bestehenden KKW kann somit

nicht in allen Ansätzen konsistent sein. Er kann aber auch nicht die Ansprüche erfüllen, die aufgrund des vorliegenden Kenntnisstandes an neu zu errichtende KKW zu stellen wären.

Die Vorgaben Technischer Regelwerke repräsentieren zwar die Erfahrung und auch neuere Erkenntnisse; sie berücksichtigen diese aber nur zusammengefaßt über einen ganzen Entwicklungszeitraum. Darüber hinaus lehnen sich Regelwerke vielfach an die technische Ausführung einzelner Einrichtungen an. Für das Spektrum der bestehenden Anlagen sind daher die Vorgaben, wie sie in weiten Teilen des kerntechnischen Regelwerks zu finden sind, als einheitliche Bewertungsbasis weniger geeignet.

Der Vorschlag für einen einheitlichen Bewertungsmaßstab ist das Schutzzielkonzept, dessen Struktur nunmehr vorgestellt wird. Die längere Einführung dafür war jedoch erforderlich, um das Schutzzielkonzept in die Zusammenhänge besser einordnen zu können.

Wie sieht nun die Grundstruktur des Schutzzielkonzepts aus und welche Überlegungen haben dazu geführt?

## 4. Grundstruktur des Schutzzielkonzepts

Die ausführungsunabhängigen Sicherheitsanforderungen im Schutzzielkonzept bauen in erster Linie auf dem kerntechnischen Regelwerk auf. Jedoch sind auch neuere sicherheitsrelevante Erkenntnisse eingeflossen. Quellen dafür sind die Betriebserfahrungen, Sicherheitsanalysen sowie die Sicherheitsforschung und -entwicklung.

Ausführungsunabhängige Sicherheitsanforderungen lassen sich in die folgenden Schwerpunkte gliedern (Bild 4).

| **Kennzeichnung der ausführungsunabhängigen Sicherheitsanforderungen im Schutzzielkonzept** |
|---|
| ❑ Zu berücksichtigende Ereignisse bzw. Zustände |
| ❑ Einzuhaltende sicherheitstechnische Grundsätze bzw. zu erfüllende Kriterien |
| ❑ Anzuwendende Nachweise mit entsprechenden Anfangs- bzw. Randbedingungen |

Bild 4: Kennzeichnung der ausführungsunabhängigen Sicherheitsanforderungen im Schutzzielkonzept

Um in dieser Hinsicht die Inhalte des kerntechnischen Regelwerks und neuere sicherheitsrelevante Erkenntnisse möglichst vollständig zu erfassen, wird eine detaillierte Materialsamm-

lung erstellt. Diese liegt in weiten Teilen bereits vor. Die inhaltlich verdichteten Ergebnisse dieser Materialsammlung haben das Schutzzielkonzept wesentlich mitgestaltet.

Um die ausführungsunabhängigen Anforderungen nach ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung zu strukturieren, bietet sich das bewährte Sicherheitskonzept an. Einen Überblick über dieses gestaffelte Sicherheitskonzept mit 4 Ebenen ist in Bild 5 dargestellt.

Bild 5: Prinzip des bewährten Sicherheitskonzeptes mit 4 Ebenen

Dieses sogenannte "**defence-in-depth**"-Konzept und die gezeigten Begriffe sind allgemein bekannt und bedürfen keiner weiteren Erläuterung. Kurz gefaßt besteht das Prinzip dieses Sicherheitskonzepts darin, daß abgestufte Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen sowie technische Maßnahmen vorzusehen sind. Dadurch sind jeweils die für die nachfolgenden Ebenen charakteristischen Anlagenzustände zu vermeiden. Dementsprechend ist das Schutzzielkonzept orientiert und in Bild 6 allgemein definiert.

Als Schutzzielkonzept wird somit die Gesamtheit von Anforderungen bezeichnet, die unabhängig von der technischen Ausführung einzelner Vorkehrungen sind und im Sinne des gestaffelten Sicherheitskonzepts auf 4 Ebenen zusammenwirken. Dabei berücksichtigen die Anforderungen sowohl die Erfahrungen des Regelwerks wie auch neuere sicherheitsrelevante Erkenntnisse und kennzeichnen damit das Sicherheitsniveau nach Stand der Technik.

Wie bereits gezeigt, umfassen die Anforderungen im Schutzzielkonzept jeweils Ereignisse bzw. Zustände, Grundsätze und Nachweise. Die Anforderungen sind den einzelnen Ebenen im Schutzzielkonzept zugeordnet, die auch deren sicherheitstechnische Bedeutung bestimmen. Die Zuordnung erfolgt anhand der betreffenden Ereignisse bzw. Zustände, wobei die zu erwartenden Häufigkeiten für die Ereignisse bzw. Zustände als Orientierungshilfen genutzt werden.

**Allgemeine Definition des Schutzzielkonzepts**

**Gesamtheit ausführungsunabhängiger Anforderungen**

- ❑ mit Zusammenwirken im Sinne des gestaffelten Sicherheitskonzepts mit 4 Ebenen
- ❑ aufbauend auf dem Regelwerk
- ❑ unter Berücksichtigung neuerer sicherheitsrelevanter Erkenntnisse

Bild 6: Allgemeine Definition des Schutzzielkonzepts

Zur Orientierung dienen relevante Häufigkeitsbereiche für die einzelnen Ebenen des Schutzzielkonzepts. Diese wurden anhand von Eckwerten aus der Betriebserfahrung und aus PSA eingegrenzt (Bild 7).

In diesem Bild sind die bereits bekannten Ebenen aus dem gestaffelten Sicherheitskonzepts wieder aufgeführt. Daneben ist schematisch dargestellt, wie die Anlagenzustände zu verstehen sind. Dies heißt z.B. für die Ebene 3: Der Anlagenzustand "Störfälle" ist dadurch gekennzeichnet, daß Sicherheitseinrichtungen angefordert und auch verfügbar sind. In den drei mittleren Spalten sind probabilistische Eckwerte aufgeführt, auf denen sich die Eingrenzung abstützt. Ganz rechts sind die für die Ebenen ermittelten Häufigkeitsbereiche zu sehen. Auf die Einzelheiten dieses Bildes und der Eingrenzung selbst soll bis auf eine Ausnahme nicht weiter eingegangen werden. Die Ausnahme ist der untere Grenzwert der Ebene 4, der im Bild hervorgehoben ist. Während alle anderen Werte nur zur Orientierung dienen, wird dieser Wert im Schutzzielkonzept auch explizit berücksichtigt. Denn er bestimmt letztlich die Bandbreite des Schutzzielkonzepts nach unten, d.h. zu extrem seltenen Häufigkeiten hin.

Um diesen Wert einzugrenzen, wurde auf einen internationalen Erfahrungswert aus den sogenannten INSAG-Empfehlungen (International Nuclear Safety Advisory Group) zurückgegriffen. Dieser betrifft die Summenhäufigkeit von Kernschäden; d.h. also von allen Zuständen, die über die letzte gestaffelte Ebene hinausgehen. Hierzu wird in INSAG ein Richtwert von $10^{-5}$ pro Jahr für bestehende Anlagen angegeben. Dieser Wert ist oberhalb der Ebene 4 eingezeichnet. Um diesen Richtwert einzuhalten, wird mit Ebene 4 noch allen auslösenden Ereignissen Rechnung getragen, für die eine Häufigkeit größer $10^{-7}$ pro Jahr zu erwarten.

**Orientierungshilfen im "Schutzzielkonzept" durch relevante Häufigkeitsbereiche für die gestaffelten Ebenen**

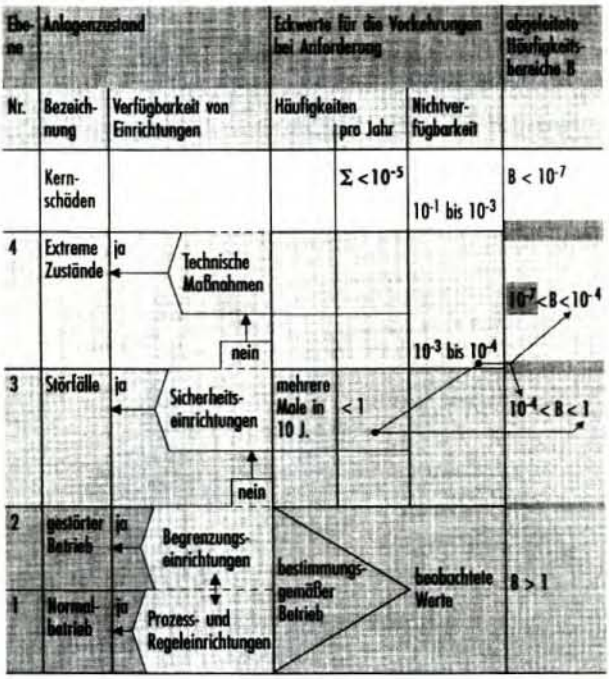



Bild 7: Orientierungshilfen im "Schutzzielkonzept" durch relevante Häufigkeitsbereiche für die gestaffelten Ebenen

Unter Berücksichtigung der durchgeführten PSA ist dann davon auszugehen, daß der INSAG Richtwert für die bestehenden Anlagen unterschritten wird.

In Anbetracht derart kleiner Häufigkeiten spielen auf Ebene 4 die Unterschiede von auslösenden Ereignisse und dadurch ausgelösten Zuständen praktisch kaum noch eine Rolle. Hinzu kommt, daß auslösende Ereignisse jeweils zu einer Vielzahl von Zuständen mit unterschiedlichen Häufigkeiten führen. Davon sind aber nur noch die von Bedeutung, die innerhalb des Gültigkeitsbereichs des Schutzzielkonzepts liegen. Deshalb sind im Schutzzielkonzept auf Ebene 4 ausschließlich dominante Zustände und keine Ereignisse mehr berücksichtigt.

Wie schon gesagt, orientiert sich die sicherheitstechnische Bedeutung der Anforderungen im Schutzzielkonzept an den Häufigkeiten, die mit den betreffenden Ereignissen bzw. Zuständen verbunden sind. Durch die in der rechten Spalte aufgeführten Häufigkeitsbereiche ist jeweils ein ganzes Spektrum von Ereignissen bzw. Zuständen für die einzelnen Ebenen gekenn-

zeichnet. Im Schutzzielkonzept werden die folgenden Zustände bzw. Ereignisse verwendet (Bild 8):

- beobachtete Ereignisse auf den Ebenen des bestimmungsgemäßen Betriebs,
- auslösende Ereignisse auf der Störfall-Ebene sowie
- extreme Zustände auf der Ebene der Schweren Störfälle.

Wie sind nun diese auf den einzelnen Ebenen verwendeten Ereignisse bzw. Zustände im Rahmen der Anforderungen des Schutzzielkonzepts inhaltlich strukturiert.

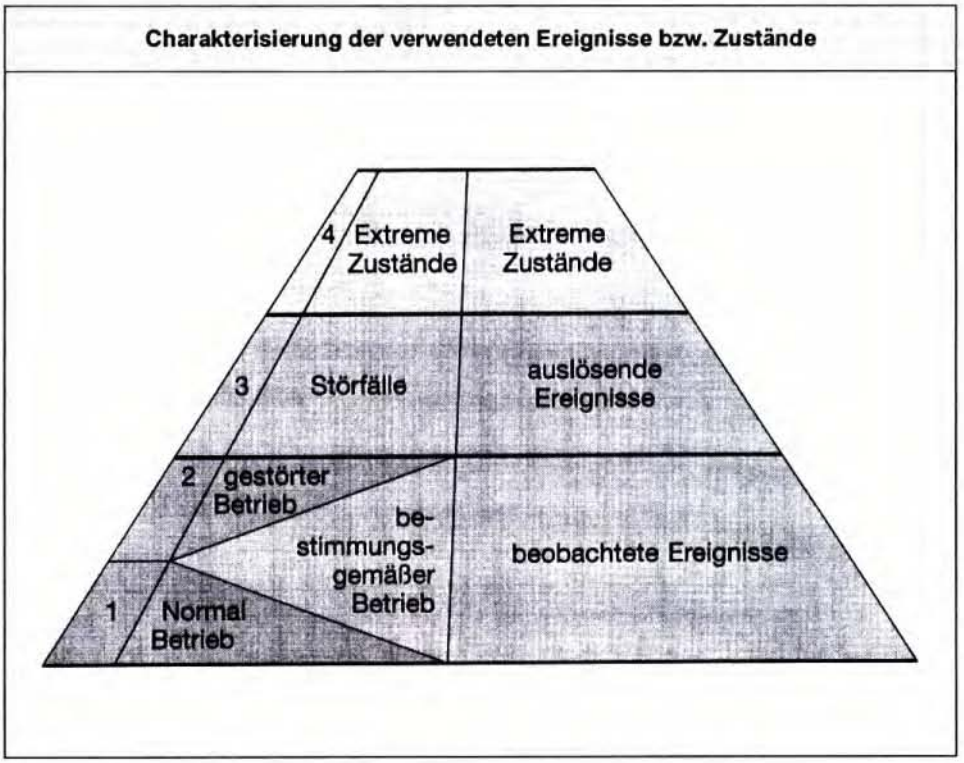



Bild 8: Charakterisierung der verwendeten Ereignisse bzw. Zustände

## 5. Struktur der Ereignisse bzw. Zustände im Schutzzielkonzept

Mit den Ereignissen bzw. Zuständen sind jeweils physikalische Phänomene verbunden. Diese wurden genutzt, um für einzelne Ebenen des Schutzzielkonzepts repräsentative Ereignisse bzw. Zustände festzulegen, für die sicherheitstechnische Grundsätze bzw. entsprechende Kriterien zu erfüllen und nachzuweisen sind (Bild 9).

**Zusammenfassung der repräsentativen Ereignisse bzw. Zustände im Schutzzielkonzept**

| Ebene | Anlagenzustand | Zusammenfassungen der repräsentativen Ereignisse bzw. Zustände |
|---|---|---|
| 4 | Extreme Zustände | **Extreme Zustände** der<br>• Reaktivität des Reaktorkerns<br>• sekundär- und primärseitigen Wärmeabfuhr<br>• elektrischen Energieversorgung<br>• Beanspruchung des Sicherheitseinschlusses |
| 3 | Störfälle | **auslösende Ereignisse**<br>• Transienten und kleine KMV infolge übergreifender Einwirkungen<br>• Hilfsanlagenversagen<br>• Brennelementhandhabungsfehler<br>• mittlere und große KMV mit Leckquerschnitt bis 0,1 F<br>• kleine KMV mit Leckquerschnitt bis etwa 120 $cm^2$<br>• Reaktivitätstransienten<br>• Transienten infolge Ausfall der betriebl. Wärmeabfuhr |
| 2 | gestörter Betrieb | **beobachtete Ereignisse**<br>• Anlagennichtverfügbarkeiten<br>• Nichtverfügbarkeiten von Betriebssystemen<br>• aufgetretene Störereignisse<br>• Prüfungen |
| 1 | Normalbetrieb | |

bestimmungsgemäßer Betrieb

Bild 9: Zusammenfassung der repräsentativen Ereignisse bzw. Zustände im Schutzzielkonzept

Die angegebenen Zusammenfassungen beziehen sich auf anlagenunabhängige, d.h. generische repräsentative Ereignisse bzw. Zustände. Dabei ist zwischen DWR und SWR zu unterscheiden. Die nachfolgenden Erläuterungen beschränken sich jedoch auf DWR.

Auch hier sind die Ebenen 1 und 2 zum bestimmungsgemäßen Betrieb zusammengefaßt. Dieser stützt sich auf eine umfangreiche Betriebserfahrung ab. Aufgetretene Schwachstellen sind im Rahmen der Eigenverantwortung des Betreibers oder der Aufsicht erkannt und beseitigt. Somit bleibt zu überprüfen, ob sich womöglich im zeitlichen Verlauf der Betriebserfahrungen Trends mit Hinweisen auf bisher nicht erkannte Schwachstellen zeigen und damit auf eine erhöhte Störfallanfälligkeit hinweisen. Entsprechend sind die repräsentativen Ereignisse ausgerichtet.

Mit den repräsentativen Ereignissen auf der Ebene 3 werden alle auslösenden Ereignisse erfaßt, die auch bei der Auslegung der Sicherheitseinrichtungen bisher zu berücksichtigen

sind. Ausgenommen bleibt im wesentlichen der 2F-Bruch; d.h. der Kühlmittelverlust infolge eines doppelendigen Bruchs einer Hauptkühlmittelleitung. Begründet ist dies durch die Nachqualifizierungen zur Basissicherheit sowie zum Bruchausschlußkonzept für die Kühlmittelumschließung. Dadurch ist für den 2F-Bruch eine erheblich kleinere Häufigkeit zu erwarten, als der Häufigkeitsbereich der Störfallebene umfaßt. Die Häufigkeit ist sogar so niedrig einzuschätzen, daß auch noch der Häufigkeitsbereich der Ebene 4 unterschritten wird. Trotzdem sind auf dieser Ebene damit verbundene Ausströmvorgänge erfaßt. Neuere Erkenntnisse aus der Notkühl-Forschung von LWR zeigen, daß mit diesem Vorgehen auch keine Sicherheitseinbußen auf der Störfallebene verbunden sind.

Mit dem letzten Punkt der Störfallebene 3 sind übergreifende Einwirkungen angesprochen. Dazu zählen z.B. anlageninterne Überflutungen und Brände sowie standortspezifische, naturbedingte Einwirkungen. Übergreifende Einwirkungen haben aber von sich aus schon eine geringe Eintrittshäufigkeit. Für dadurch ausgelöste Transienten und kleine Kühlmittelverluste sind daher im Schutzzielkonzept auch geringere Anforderungen zu erfüllen.

**Beispiele für DWR-spezifische repräsentative Extreme Zustände**

- ❑ Extremer Reaktivitätszustend des Reaktorkerns
  - ○ RESA ohne Leistungsreduzierung
- ❑ Extremer Zustand der sekundär- und primärseitigen Wärmeabfuhr
  - ○ Absinken der Dampferzeuger (DE)-Füllstände mit der Tendenz zur völligen Ausdampfung der Sekundärseite durch Ausfall der DE-Bespeisung
- ❑ Extremer Zustand der elektrischen Energieversorgung
  - ○ Ausfall der gesamten Drehstromversorgung soweit nicht batterieversorgt für 2 Stunden
- ❑ Extremer Beanspruchungszustand der Sicherheitsbeschlusses
  - ○ Mechanische und thermische Belastungen mit Ausfall der sekundärseitigen Wärmeabfuhr

Bild 10: Beispiele für DWR-spezifische repräsentative Extreme Zustände

Inwieweit die repräsentativen Extremen Zustände auf der Ebene 4 für die einzelnen Anlagen von Bedeutung sind, bleibt nach Schutzzielkonzept letztlich einer anlagenspezifischen Bewertung vorbehalten. Diese orientiert sich am probabilistischen Gültigkeitsbereich des Schutzzielkonzepts zu extrem kleinen Häufigkeiten hin.

In Bild 10 sind Beispiele für repräsentative Extreme Zustände gezeigt. Insgesamt wurde mit den Zuständen einem breiten Spektrum auslösender Ereignisse Rechnung getragen. Dazu zählen insbesondere

- nicht beherrschte Störfälle der Ebene 3,
- schnelle Reaktivitätstransienten und
- zivilisatorische Einwirkungen.

Eine Zuordnung im einzelnen würde aber dem Sinn der repräsentativen Extremen Zustände widersprechen.

Für die repräsentativen Ereignisse bzw. Zustände sind im Schutzzielkonzept sicherheitstechnische Grundsätze und Kriterien einzuhalten. Dementsprechend ist in Bild 11 eine konkretere Definition des Schutzzielkonzepts gegeben.

**Erweiterte Definition des Schutzzielkonzepts**

**Auf 4 gestaffelten Ebenen, kennzeichnend für die Anlagenzustände: Normalbetrieb, gestörter Betrieb, Störfälle und Extreme Zustände**

- zu berücksichtigende Ereignisse bzw. Zustände
- einzuhaltende sicherheitstechnische Grundsätze, die auch die Schutzziele umfassen:
  - Reaktivitätskontrolle
  - Brennelementkühlung
  - Rückhaltung radioaktiver Stoffe
  - Kontrolle der Emission
- und für die Grundsätze zu erfüllende Kriterien
- Rahmenvorgaben für die
  - Nachweise zur Einhaltung der sicherheitstechnischen Grundsätze und Kriterien
  - Beurteilung von Abweichungen

Bild 11: Erweiterte Definition des Schutzzielkonzepts

Somit umfassen die Vorgaben des Schutzzielkonzepts auf 4 Ebenen abgestufte Ereignisse bzw. Zustände mit den dafür einzuhaltenden Grundsätzen und Kriterien. Die Grundsätze

Somit umfassen die Vorgaben des Schutzzielkonzepts auf 4 Ebenen abgestufte Ereignisse bzw. Zustände mit den dafür einzuhaltenden Grundsätzen und Kriterien. Die Grundsätze beinhalten auch die bekannten sicherheitstechnischen Schutzziele Reaktivitätskontrolle, Brennelementkühlung, Einschluß und Emission radioaktiver Stoffe, die dem Schutzzielkonzept den Namen gegeben haben. Darüber hinaus wird im Schutzzielkonzept auch ein Rahmen für die zu führenden Nachweise und zur Beurteilung festgestellter Abweichungen vorgegeben.

## 6. Struktur der einzuhaltenden Grundsätze und Kriterien

Die sicherheitstechnischen Grundsätze und Kriterien bestimmen den Schutz, der in den einzelnen Ebenen hinsichtlich der repräsentativen Ereignisse bzw. Zustände zu treffen ist (Bild 12).

Mit dem angegebenen Grundsatz für den bestimmungsgemäßen Betrieb soll einer unbemerkten Beeinträchtigung betrieblicher Einrichtungen mit der Möglichkeit einer erhöhten Störfallanfälligkeit entgegengewirkt werden.

Eine Möglichkeit, solche Hinweise aus der Betriebserfahrung zu erhalten, läßt sich am Prinzip der sogenannten Badewannenkurve verdeutlichen (Bild 13). Diese Kurve spiegelt die bekannte Erfahrung wider, daß die Ausfallstatistik technischer Einrichtungen drei Bereiche durchläuft. Nach anfänglich hohen Ausfallraten nehmen diese mit zunehmender Betriebserfahrung ab. Anschließend an die Phase der Inbetriebnahme durchlaufen sie mit nahezu konstanten Werten die Zeiträume der vorgesehenen betrieblichen Auslegung. Im Auslaufbetrieb kommt es dann wieder zu einem Anstieg. Die Ausfälle der Badewannenkurve kumuliert, d.h. jeweils aufsummiert, aufgetragen ergibt die zweite im Bild dargestellte Kurve. Die Steigung dieser Kurve ist somit ein Hinweis für die jeweilige Betriebsphase.

Ein signifikanter Trend durch unproportionalen Anstieg wäre somit ein Anzeichen, daß der vorgesehene Betriebszeitraum überschritten sein könnte. Ein derartiger Anstieg oder Schwankungen im Verlauf könnte aber auch der Hinweis auf bisher nicht erkannte Schwachstellen im Betriebszeitraum selbst sein.

Über der Beobachtungszeit ist die aufsummierte Anzahl der Schnellabschaltung eines KKW punktweise aufgetragen. Die eingezeichneten Geraden zeigen zwei Trends. Davon weist der Trend 2 auf einen überproportionalen Anstieg hin. Würde die Trendverfolgung der Beobachtungen bei mehreren der zu berücksichtigenden Ereignisse derartige Abweichungen zeigen, müßte nach Schutzzielkonzept eine Ursachenklärung erfolgen.

Nun wieder zurück zu den einzuhaltenden Grundsätzen (Bild 12). Wie im rechten Teil ersichtlich, gelten für die Ebenen 3 und 4 zwar die gleichen Ansätze für den Schutzumfang. Jedoch bestehen auf den Ebenen ganz erhebliche Unterschiede, wie der Schutzumfang auszubilden ist. Auf der Störfallebene 3 sind für die repräsentativen Ereignisse Sicherheitsfunktionen vorzusehen. Durch die Sicherheitsfunktionen ist der spezielle Schutzumfang für die Ebene 3 zu gewährleisten.

<table>
<tr><th colspan="4">Einzuhaltende Grundsätze</th></tr>
<tr><th>Ebene</th><th>Bezeichnung</th><th colspan="2">Einzuhaltende Grundsätze</th></tr>
<tr><td>4</td><td>Extreme Zustände</td><td>❍ Schutz durch technische Maßnahmen gegen die repräsentativen Extremen Zustände mit speziellem Schutzumfang</td><td rowspan="3">❍ Spezieller Schutzumfang mit speziellen<br>● Schutzzielen<br>● Wirksamkeiten<br>● Zuverlässigkeiten<br>und entsprechenden Kriterien sowie Randbedingungen für Sicherheitsfunktionen bzw. Technische Maßnahmen</td></tr>
<tr><td>3</td><td rowspan="2">Störfälle</td><td>❍ Schutz durch Sicherheitsfunktionen gegen die repräsentativen Ereignisse mit speziellem Schutzumfang</td></tr>
<tr><td>❍ Vermeidung signifikanter Trends der technischen Ausführungen der Sicherheitsfunktionen</td></tr>
<tr><td>2<br>1</td><td>Bestimmungsgemäßer Betrieb</td><td colspan="2">❍ Vermeidung signifikanter Trends bei den repräsentativen Ereignissen</td></tr>
</table>

Bild 12: Einzuhaltende Grundsätze

Dabei sind mit den Sicherheitsfunktionen die Eigenschaften von Sicherheitseinrichtungen angesprochen, die diese unabhängig von ihrer technischen Ausführung zu erfüllen haben.

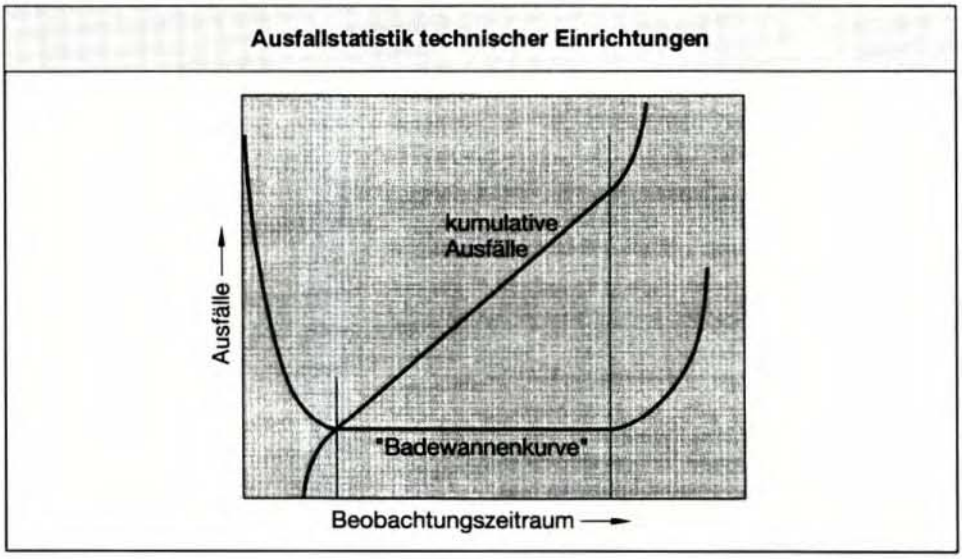



Bild 13: Ausfallstatistik technischer Einrichtungen

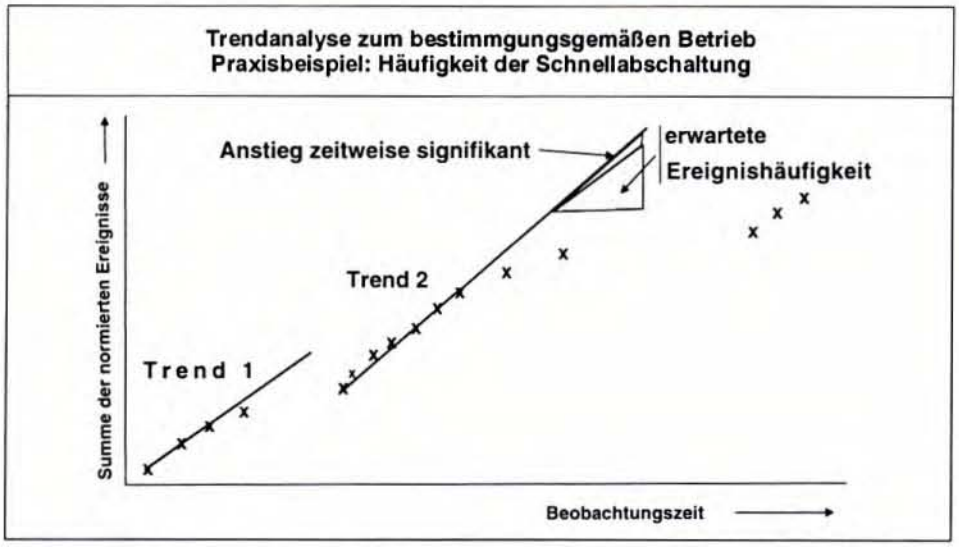



Bild 14: Trendanalyse zum bestimmgungsgemäßen Betrieb; Praxisbeispiel: Häufigkeit der Schnellabschaltung

Auf der Ebene 4 der Extremen Zustände sind dagegen Technische Maßnahmen vorzusehen. Durch diese ist der spezielle Schutzumfang gegen die repräsentativen Extremen Zustände zu erreichen.

Der zusätzlich auf der Störfallebene 3 einzuhaltende Grundsatz bezieht sich auf eine Trendverfolgung bei den Beobachtungen aus den WKP und der Instandhaltung von Sicherheitseinrichtungen.

Die Unterschiede der Ebenen 3 und 4 würden sich anhand der einzuhaltenden Grundsätze zum speziellen Schutzumfang sowie der entsprechenden Kriterien weiter verdeutlichen. Dies würde aber hier zu weit führen. Die Unterschiede ergeben sich vor allem dadurch, daß ein radiologisches Schutzziel nur für die Störfallebene besteht. Auch beschränken sich die detaillierten Anforderungen für die Wirksamkeiten und Zuverlässigkeiten nur auf die Sicherheitsfunktionen.

Auf weitere Einzelheiten wird hier verzichtet und auf die Nachweisführung übergegangen. Dafür sind im Schutzzielkonzept Rahmenvorgaben vorgesehen.

## 7. Struktur der Nachweisführung

Nach Schutzzielkonzept sind spezielle Nachweise für die einzelnen Ebenen vorgesehen. Dazu können vorhandene Analysen und Bewertungen genutzt werden. Neuere Erkenntnisse schlagen sich im Schutzzielkonzept aber auch in den Rahmenvorgaben für die Nachweisführung nieder. Werden vorhandene Analysen und Bewertungen genutzt, ist die Übereinstim-

mung mit den Rahmenvorgaben zu überprüfen. Erforderlichenfalls sind neue Analysen und Bewertungen zu erstellen. Stimmen die Ergebnisse aus Analysen und Bewertungen mit den einzuhaltenden Grundsätzen nach Schutzzielkonzept überein, ist der Nachweis geführt. Andernfalls sind die Abweichungen nach den entsprechenden Rahmenvorgaben des Schutzzielkonzepts festzustellen (Bild 15).

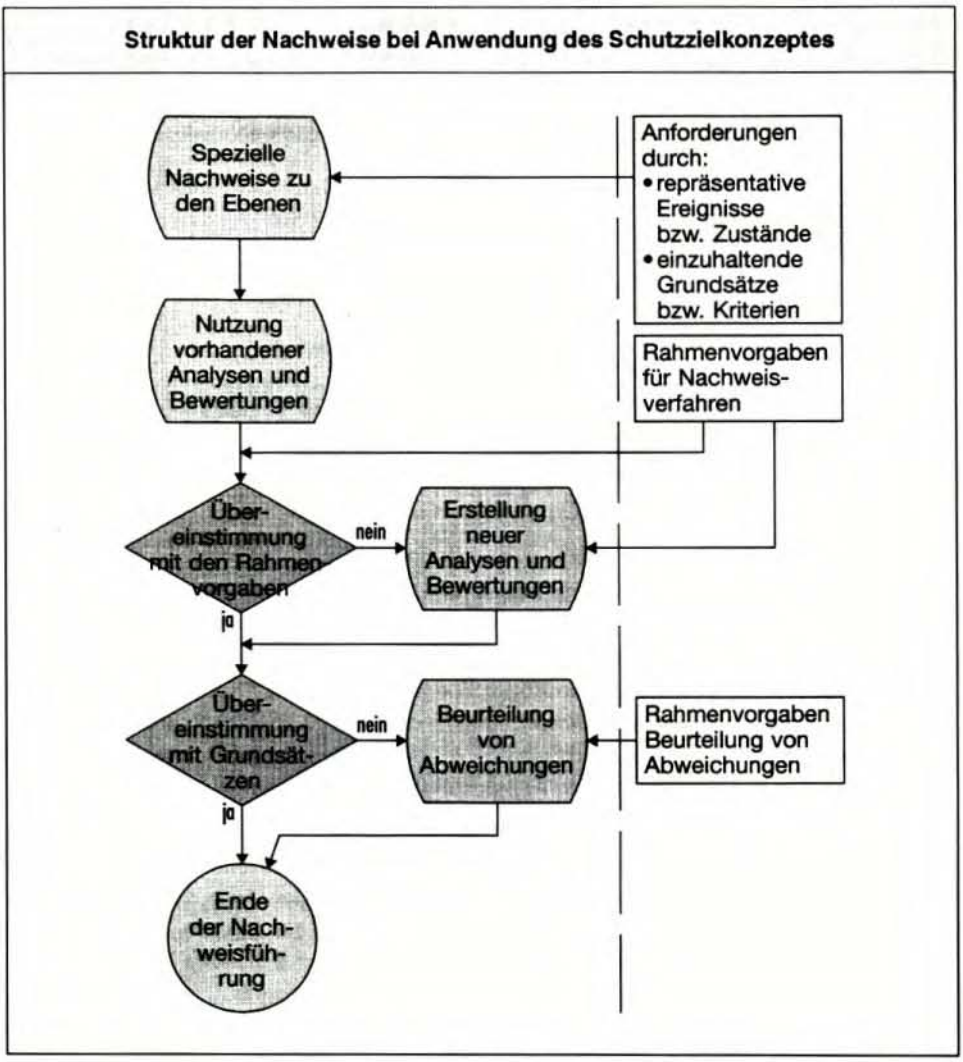



Bild 15: Struktur der Nachweise bei Anwendung des Schutzzielkonzeptes

Die Rahmenvorgaben für die Nachweisführung geben Hinweise über Inhalt und Art der Nachweise sowie die dabei einzuhaltenden Anfangs- und Randbedingungen. Darauf soll hier

aber nicht weiter eingegangen werden. Grundsätzlich wird aber bei den Nachweisen auf den einzelnen Ebenen zwischen detaillierten Analysen und ingenieurmäßigen Betrachtungen unterschieden.

| **Rahmenvorgaben für die Beurteilung von Abweichungen** | |
|---|---|
| **Festgestellte Abweichungen in Ebene** | **Dringlichkeit der Beseitigung** |
| **4 Extreme Zustände** | Abhängig von Häufigkeiten H nicht beherrschter Zustände: |
| **3 Störfälle** | ○ keine Notwendigkeit:<br>● $H < 10^{-7}/a$<br>○ ohne besondere Dringlichkeit:<br>● $10^{-7}/a < H < 10^{-5}/a$<br>● bei angemessenem Aufwand |
| **1, 2 Bestimmungsgemäßer Betrieb** | ○ mittel- bis kurzfristig (nächste Revision):<br>● $10^{-5}/a < H < 10^{-3}/a$<br>○ schnellstmöglich:<br>● $H > 10^{-3}/a$ |

Bild 16: Rahmenvorgaben für die Beurteilung von Abweichungen

Wegen ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung ist es jedoch erforderlich, noch kurz auf die Rahmenvorgaben zur Beurteilung von Abweichungen einzugehen. Diese sind nachfolgend zusammengestellt. Dabei bedeuten Abweichungen, daß Grundsätze des Schutzzielkonzepts nicht eingehalten bzw. entsprechende Kriterien nicht erfüllt werden. Dabei bestehen ebenfalls Rahmenvorgaben zur Feststellung von Abweichungen für die einzelnen Ebenen.

Bei festgestellten Abweichungen ist die Dringlichkeit der Beseitigung unabhängig von der betroffenen Ebene. Sie orientiert sich am sicherheitstechnischen Stellenwert der Abweichung im Schutzzielkonzept. Dieser Stellenwert wird in erster Linie gemessen an der Bedeutung hinsichtlich nichtbeherrschter Zustände der Kernkühlung und den damit verbundenen Eintrittshäufigkeiten. Wie eingangs erläutert, ist der entsprechende INSAG Wert ein entscheidender Eckwert für das Schutzzielkonzept. Demnach hat eine bestehende Anlage ein angemessenes Sicherheitsniveau, wenn dieser Summenwert nicht überschritten wird. Die angegebenen Dringlichkeitsstufen für die jeweiligen Häufigkeitsbereiche sind an Erfahrungswerten ausgerichtet, die sich an dem INSAG-Summenwert orientiert.

## 8. Zusammenfassung

Die wesentlichen Aspekte des vorgestellten Schutzzielkonzepts sind nachfolgend nochmals schematisch dargestellt (Bild 17).

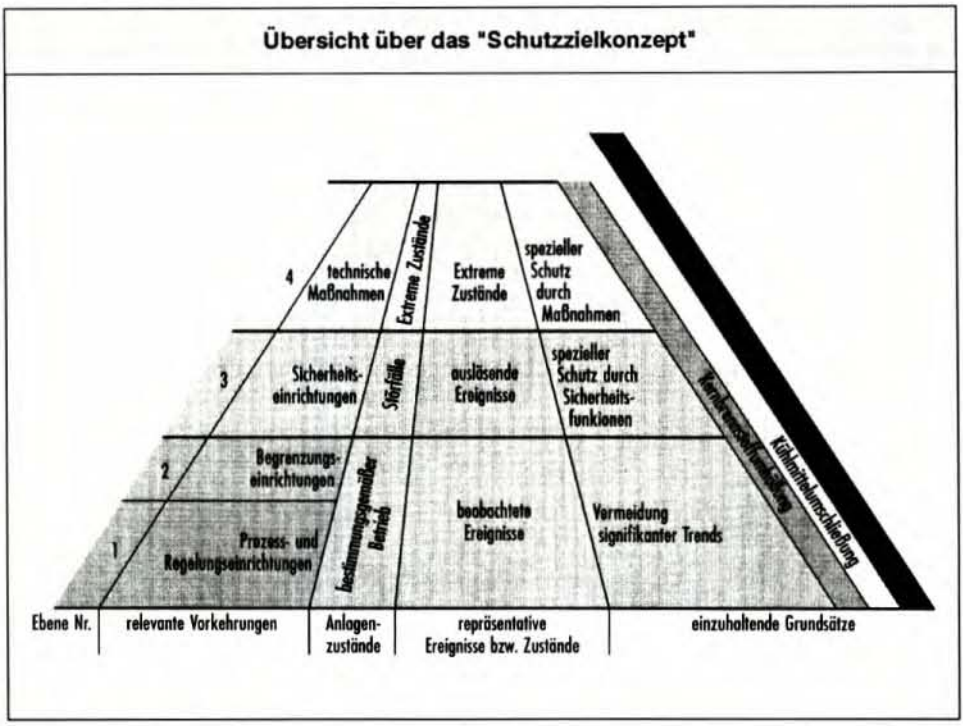



Bild 17: Übersicht über das "Schutzzielkonzept"

Das Schutzzielkonzept ist ein Vorschlag, das bewährte "**defence-in-depth**"-Konzept ganzheitlich durch ausführungsunabhängige Sicherheitsanforderungen zu erfassen. Dabei sind die Anforderungen an die Belange einer einheitlichen Sicherheitsbeurteilung für die bestehenden KKW orientiert. Sie berücksichtigen die sicherheitsrelevanten Vorgaben des kerntechnischen Regelwerks wie auch bedeutsame neuere Erkenntnisse zur Sicherheit und kennzeichnen damit das Sicherheitsniveau nach Stand der Technik.

Das Bild hebt mit seiner Darstellung die zentrale Bedeutung der repräsentativen Ereignisse bzw. Zustände im Schutzzielkonzept hervor. Rechts daneben sind die einzuhaltenden Grundsätze mit den mindestens erforderlichen Barrieren schematisch wiedergegeben. Links neben den Anlagenzuständen sind die für die Ebenen relevanten Vorkehrungen ersichtlich.

Das Schutzzielkonzept stützt sich im bestimmungsgemäßen Betrieb auf beobachtete Ereignisse ab. Es nutzt dort wie auch auf der Störfallebene die Trendverfolgung, um auch diese Möglichkeiten zur Sicherheitsverbesserung auszuschöpfen. Auf der Störfallebene 3 sind

Sicherheitsfunktionen erforderlich, um den speziellen Schutz gegen die auslösenden Ereignisse zu erreichen. Auf der Ebene 4 der Extremen Zustände sind technische Maßnahmen dagegen vorzusehen. Dabei ist durch die technischen Maßnahmen ein spezieller Schutz zu erreichen.

Mit dem Schutzzielkonzept könnte die Angemessenheit des Sicherheitsniveaus der bestehenden KKW einheitlich und nach derzeitigem Erkenntnisstand beurteilt werden. Das Schutzzielkonzept kann und will aber nicht die technische Einzelbewertung ersetzen. Es gibt jedoch einen Anhalt, die Einzelbewertungen und den dafür erforderlichen Aufwand nach der sicherheitstechnischen Bedeutung inhaltlich richtig einzuordnen.

# Die neue Generation der Informationstechnik - Sicherheitsgewinn beim Einsatz in Kernkraftwerken

**W. Bastl**

## 1. Einleitung

Die Führung komplexer Prozesse wird durch Information über den Prozeßzustand und durch daraufhin erfolgende Eingriffe in das Prozeßgeschehen, über Stellglieder ermöglicht. Dabei hat die Betriebsmannschaft zunächst aus einer Vielzahl von Anzeigen, die den Stand wichtiger Betriebsparameter angeben, den Zustand des Prozesses abzuleiten, um gegebenenfalls korrigierend eingreifen zu können. Es ist evident, daß eine gute und sichere Betriebsführung abhängt von

- der Verfügbarkeit zuverlässiger Meßsignale (Primärinformationen) aus der Anlage und
- den richtigen Schlußfolgerungen der Betriebsmannschaft über den Prozeßverlauf durch Interpretation dieser Meßsignale.

In den vergangenen Jahren hat das Bemühen um immer bessere Information in der Warte zu einem drastischen Anstieg der Meldungen, Anzeigen und Alarme geführt, so auch beim Kernkraftwerk. Hand in Hand mit diesem Ansteigen der Primärinformation gingen die Bemühungen, die Informationsflut durch geschickte Anordnung auf den Wartentafeln und Pulten, durch Verwendung von Blindschaltbildern, durch Mini-Wartentechnik usw., zu beherrschen. Weiterhin machte die Automatisierung der Anlagen einen kolossalen Fortschritt. Getreu der Devise, dem Menschen ermüdende immer wiederkehrende Steuerungseingriffe zu ersparen sowie bei komplexen Regelungsvorgängen Fehler bei Handeingriffen zu vermeiden, wurden immer mehr Automatiken eingesetzt. Die Rolle des Operateurs hat begonnen sich zu wandeln und zwar in Richtung eines übergeordneten Beobachters und Managers der Anlage, der nur noch selten direkt in das Prozeßgeschehen eingreift. Damit wird es notwendig, dem Betriebspersonal Informationen über die Arbeitsweise der automatischen Einrichtungen zu geben. Dies führt letztlich zu einer weiteren Vergrößerung des Informationsumfanges in der Warte.

Die grundsätzlichen Aufgaben der Informationstechnik sind aus Bild 1 ersichtlich, nämlich Anzeigen über das Verhalten der verfahrenstechnischen Prozesse und Systeme sowie der automatischen Einrichtungen und Stellglieder in der Warte verfügbar zu machen. Die angegebenen Zahlen beziehen sich auf das Mengengerüst eines 1000 MW Kernkraftwerkes. Um die Informationsfülle bewältigen zu können, ist eine Informationskondensation notwendig, d.h.

- weitere Verarbeitung der primären Meßfühlersignale, von einfachen logischen Signalverknüpfungen bis zur Anwendungen von komplexen Algorithmen und
- situationsabhängige Darstellung der Information, z.B. durch geeignete Zusammenfassungen auf Bildschirmen, Anwendungen von Diagrammen, mehrdimensionalen Darstellungen usw.

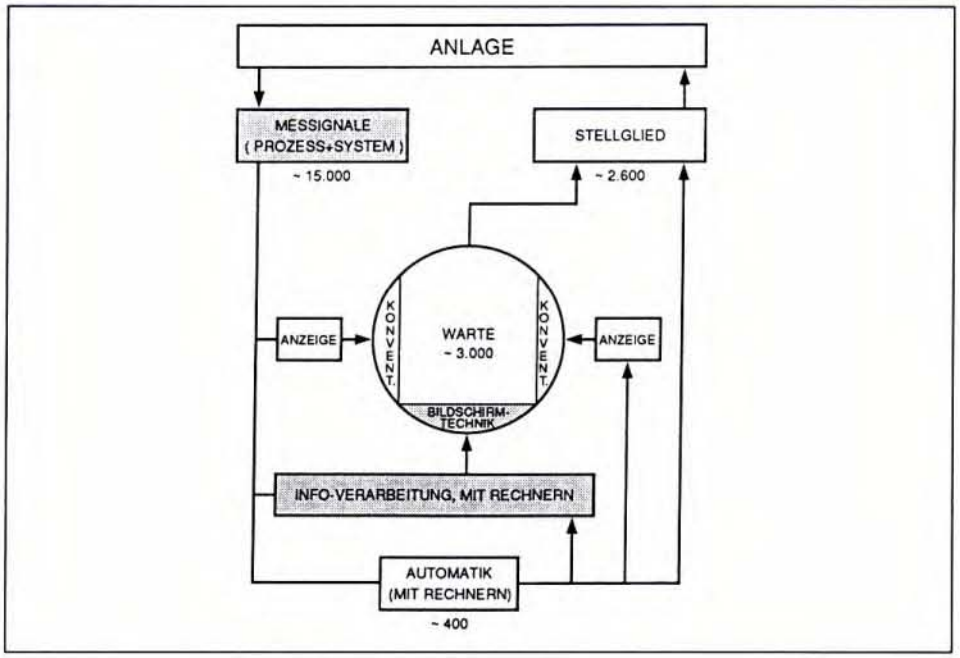



Bild 1: Konventionelle und neue Informationstechnik

Dieses Ziel kann durch die inzwischen auch in der Prozeßführung einsetzbare Digitaltechnik erreicht werden, die nicht nur einen technologischen Wandel in der Meß- und Regelungstechnik, sondern vor allem auch in der Prozeß-Informationstechnik (im folgenden kurz Informationstechnik genannt) bewirkt hat. Charakteristikum dieser Technik ist die Umwandlung der analogen Meßwerte in Digitalsignale (neuerdings gibt es auch Digitalmeßfühler, bei denen die Umwandlung in der Meßeinrichtung selbst erfolgt) und die Anwendung digitaler Signalverarbeitung im gesamten Informationssystem. Im Gegensatz dazu werden in der bisher eingesetzten Analogtechnik die physikalischen Größen in analogen Strömen (z.B. 1 - 10 mA) dargestellt und auch weiterverarbeitet. Die digitale Informationsverarbeitung hat vor allem auch durch Einsatz von Digitalrechnern eine Reihe von Vorteilen:

- Die Abspeicherung von Prozeßdaten und Zusatzinformationen (Anlagenmerkmale, Anlagendaten, u.ä.) in Datenbanken und ihre Bereithaltung für Informationszwecke.
- Die Verteilung der Daten mit Hochleistungsdatenträgern und Datennetzen.
- Wesentliche Verbesserung und Flexibilität der Dokumentation.
- Die einfache Abrufmöglichkeit der Daten und Informationen je nach Bedarf des Benutzers.
- Wesentliche verbesserte Beobachtbarkeit der Prozeßzustände (Kennlinienkorrektur, Driftkompensation, Selbstkalibrierung).

- ❑ Die Einsetzbarkeit komplexer Methoden der Datenverarbeitung zur Informationsgewinnung (z.B. für Diagnose und Prognose).
- ❑ Hohe Flexibilität bei etwa notwendigen Änderungen (Software).
- ❑ Wesentliche Einsparungen bei Verkabelung und Installation.
- ❑ Leichtes Umsetzen von Testroutinen.
- ❑ Gute Einsetzbarkeit von on-line-Testmethoden.

Vorliegender Beitrag bezieht sich unter dem Titel "Die neue Generation der Informationstechnik" auf die Methoden der Informationserzeugung und -darstellung aus den Primärinformationen durch Einsatz der Digitaltechnik. Dabei wird versucht, den erzielbaren Sicherheitsgewinn durch Herausarbeiten der Funktionalität der Informationssysteme transparent zu machen. Es werden verschiedene konkrete Anwendungen gezeigt, wobei auch zwei Beispiele aus der Flugzeugtechnik erläutert werden. Auf die sehr wichtigen Fragen der Hardware- und Softwarezuverlässigkeit kann im Rahmen dieses Beitrags nur kurz eingegangen werden.

## 2. Anwendungen in der KKW-Technik

### 2.1 Bildschirmtechnik

In heutigen Kernkraftwerkswarten wird Bildschirmtechnik in zunehmendem Maße eingesetzt, um die eingangs genannten Vorteile der neuen Informationstechnik dort zu nutzen, wo eine Zusammenfassung einer Vielzahl von einzelnen Informationen oder die Komplexität eines Informations-Sachverhalts dies erfordern. In frühen Anwendungen wurden nur ein oder zwei Bildschirme eingesetzt, etwa um Alarmübersichten zu bringen oder Übersichtsdarstellungen zu ermöglichen. Heute werden mehrere Bildschirme in zwei- oder mehrreihigen Anordnungen eingesetzt. Bei PRISCA (Siemens) für Druckwasserreaktoren z.B. je sechs Bildschirme am Pult für den Reaktorleitstand und den Turbinenleitstand sowie die Informationswand mit acht Bildschirmen. Dies bringt ganz wesentliche Vorteile:

- ❑ Prozeßvorgänge sind auf verschiedene Art und Weise darstellbar. Dadurch wird die Information transparenter. So kann die Arbeitsweise komplexer automatischer Steuerungsvorgänge verständlich dargestellt werden, z.B. die verschiedenen automatischen Eingriffe beim lokalen Kernschutz.
- ❑ Die mehrfache unterschiedliche Darstellung ein und desselben Sachverhalts erhöht die Fehlertoleranz der Gesamtinformation. Etwa auftretende Fehler/Inkonsistenzen in der Information können in der Regel leicht entdeckt werden.
- ❑ Die wichtigste Information kann an zentraler Stelle erfolgen. Informationen, die nur sporadisch beobachtet werden müssen, können auf Parkpositionen an den Bildschirmrändern zur Anzeige gebracht werden.
- ❑ Übersichtsdarstellungen und detaillierte Darstellungen können zügig auf den Bildschirm geholt werden. Dies ermöglicht im praktischen Betrieb rasche Ursachenermittlung von Störungen.

- Nicht benutzte Bildschirme können während des ungestörten Betriebs dazu verwendet werden, bei Auftreten plötzlicher Störungen automatisch Übersichten empfohlener Bilder bereitzustellen.

Der rasche Zugang auch zu einer großen Anzahl von Darstellungen und Diagrammen wird neben einem streng hierarchischem Aufbau der Bilder durch direkte Abrufbarkeit von "Nachbarinformationen" sowie durch Hilfefunktionen (Instruktionen) für den Benutzer erreicht.

Somit ergibt sich zusammenfassend, daß die Bildschirmtechnik nicht nur konventionelle Informationsarten ersetzen kann, sondern mit Hilfe dieser Technik eine grundsätzliche Verbesserung der Anlageninformation erreicht wird. Dabei sind im allgemeinen zwei Darstellungsarten zu unterscheiden:

- Systemübersichten (mit eingeblendeten Meßwerten) in hierarchischer Struktur, die den Benutzer zu immer detaillierterer Information, bis hin auf Komponentenniveau, führen.
- Aufgaben- bzw. funktionsorientierte Darstellungen, die eine ausführliche Information über den Status und das dynamische Verhalten der zu beobachtenden Prozesse ermöglicht.

Beide Darstellungsarten bedeuten eine neue Dimension der Information. Die erstere ermöglicht einen schnellen und leichten Zugang zur Information, wenn ein Problem vom Systemniveau ausgehend zurückverfolgt werden muß. Die letztere bewirkt einen engeren Kontakt der Betriebsmannschaft zum Anlagenverhalten und damit eine Transparenz der Prozesse, einschließlich automatischer Regelungseinrichtungen, die bisher nicht erzielt werden konnte. Wenn gewünscht, können auch Informationen eingeblendet werden, die Hinweise auf notwendige Maßnahmen zur Behebung einer Störung geben. In vollem Ausbau bedeutet dies letztlich, das Betriebshandbuch auf den Rechner zu bringen.

Heute gibt es verschiedene Arten von Bildschirmanwendungen. In deutschen Kernkraftwerken wird PRISCA derzeit als additives Informationsmittel zu den bestehenden Informationssystemen in der Warte verwendet. Das kann sicher nur eine Zwischenstufe sein. Anzustreben ist die durchgehende Anwendung der neuen Informationstechnik, und zwar nicht nur für den Normalbetrieb, sondern auch bei Störfällen. Dies bietet sich vor allem im Zusammenhang mit der praktischen Umsetzung des Schutzzielprinzips an, um z.B. dem Operateur per Bildschirm den Stand der Verletzung von Schutzzielen übersichtlich darzustellen und die notwendigen Informationen über den Zustand der Anlage zu geben, damit die adäquate Notfallprozedur eingeleitet werden kann. Gerade bei Notfallbetrieb der Anlage, in dem eine Reihe von speziellen Handmaßnahmen notwendig ist und mit Sicherheit eine besondere Beanspruchung der Betriebsmannschaft vorliegt, liefert die neue Informationstechnik eine ganz wesentliche Unterstützung. Um so bedauerlicher ist es, daß die Verwendung in diesem Regime bei deutschen Anlagen in weite Ferne gerückt scheint.

Der Einsatz von Bildschirmtechnik als quasi parallele Informationsquelle mit dem Ziel, die Betriebsmannschaft mit dem neuen Informationsmittel vertraut zu machen, hat sicher viele Gründe für sich. Andererseits entsteht die Frage, ob dadurch nicht eine weitere zusätzliche Überladung des Operateurs mit Informationen erfolgt. In diesem Zusammenhang kommt das

Bayernwerk nach den bisherigen Erfahrungen zu sehr interessanten Resultaten, von denen im folgenden einige wesentliche genannt sind /1/:

- **Informationen und Automatisierung**
  - dem Operateur werden die automatischen Vorgänge nachvollziebar dargestellt, daher
  - wird der Operateur an den automatischen Prozeßabläufen besser beteiligt und
  - eine Abkopplung des Operateurs vom Prozeßgeschehen vermieden.
- **Parallele und serielle Informationen**
  - das bildgestützte System ersetzt mit seinen Übersichtsbildern weitgehend den "Rundblick" der konventionellen Warte
  - durch mehrere Bildschirme an einem Arbeitsplatz werden Nachteile serieller Informationen weigehend vermieden
  - durch die Menü-Auswahl ist die Belastung der Benutzer relativ gering
- **Plausibilität der Bilder**
  - das bildbestützte System bietet mehr Möglichkeiten zur Plausibilitätskontrolle
  - durch Vergleich von Meßwerten mit errechneten Werten sind zukünftig umfangreichere Plausibilitätskontrollen möglich.

## 2.2 Unterstützungssysteme für den Operateur

### 2.2.1 Vom SPDS zur Störungsanalyse

Der Begriff Unterstützungssysteme hat sich für spezielle Informationssysteme des Operateurs eingebürgert, die sich durch eine besonders rechenintensive Informationsverarbeitung auszeichnen, die weit über die vorher beschriebene Bildschirmtechnik hinausgeht. Der wohl erste bedeutende Vertreter dieser Art von Systemen ist das Safety Parameter Display System - SPDS (von der US NRC gefordert nach dem TMI-Störfall), das den Operateur bei der Anwendung der damals neu entwickelten symptomorientierten Prozeduren unterstützen sollte. Typische Funktionen dieser in verschiedenen Versionen unter verschiedenen Namen gebauten und immer wieder verbesserten Systeme sind:

- Anzeige über die Abweichung von Schutzzielen
- Darstellung wichtiger zugehöriger Meßwerte
- Verfolgen der einzelnen Prozeduren, bis hin zur
- Implementierung der Prozeduren auf dem Rechner und
- Verwendung spezieller Softwaremodule zur Signalvalidierung.

Nach dieser Initialzündung wurde die weitere Entwicklung von Unterstützungssystemen hauptsächlich in zwei Richtungen betrieben. Zum einen wurde daran gearbeitet, den Funktionsbereich in den Normalbetrieb auszudehnen, um eine ständige Benutzung durch den

Operateur zu erreichen und dadurch die notwendige Vertrautheit mit dem System zu garantieren. Zum anderen wurden verstärkt Anstrengungen unternommen, im Betrieb einsetzbare Systeme zur Störungsanalyse zu entwickeln.

Bereits bei den frühen Unterstützungssystemen wird deutlich, wo der Sicherheitsgewinn zu sehen ist, nämlich in der

- Reduzierung menschlicher Fehler beim Einsatz von Prozeduren durch gezielte (ausgewählte) Informationen über die Anlage und
- Information des Operateurs über den Erfolg seiner Eingriffe.

Ergänzt sei, daß ähnliche Vorteile auch für den Einsatz von Unterstützungssystemen im störungsfreien Betrieb gelten, z.B. bei Lastfolgebetrieb (USA, Belgien, Frankreich), oder bei der Speisewasserregelung während Teillast (USA).

### 2.2.2 Analyse von Unterstützungssystemen mit Simulatoren

Ein häufig angewendetes Verfahren zur quantitativen Analyse der Vorteile durch Nutzung eines Unterstützungssystems ist die Analyse mit Hilfe von Anlagen-Simulatoren. Als Beispiel seien hier einige Ergebnisse mit dem amerikanischen Emergency Operating Procedures Tracking System - EOPTS genannt, das den Operateur beim Einsatz von Prozeduren unterstützt /2/. Zunächst einige Hinweise zum Verständnis des Systems: Wichtige Aufgabe des Operateurs ist die Interpretation des Anlagenzustandes im Kontext mit den jeweils einzusetzenden Prozeduren. Diese sind zwar logisch strukturiert und im Hinblick auf möglichst einfache Anwendbarkeit konzipiert. Trotzdem treten immer wieder neuartige Situationen auf, weil letztlich jeder Störfallzustand der Anlage in einer Aktion resultiert, deren Versagen einen neuen Zustand erzeugt usw. Wir haben es also mit einem Entscheidungsnetzwerk zu tun, das viele Verzweigungen haben kann. Das bedeutet eine große Belastung für den Operateur; hier soll das EOPTS Abhilfe schaffen.

In den von EPRI und der Taiwan Power Company durchgeführten Untersuchungen an einem SWR-Simulator wurden sechs Szenarien (ATWS, Dampfleitungsbruch, LOCA, ...) analysiert, wobei jeweils Teams mit den herkömmlichen Flußdiagrammen einerseits und mit dem neuen Unterstützungssystem andererseits arbeiteten. Einige Ergebnisse sind in Bild 2 gezeigt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß

- die Arbeitsweise der Testteams durch Anwendung des Systems sehr positiv beeinflußt wurde,
- die notwendigen Entscheidungen konsistent und schnell getroffen waren,
- weniger Fehler gemacht wurden und
- begangene Fehler zum Großteil sehr rasch entdeckt und wieder behoben werden konnten.

In diesem Zusammenhang sei auf die Entwicklung von Schutzzielbildern sowie die Erarbeitung von Methoden zur Prozedurenanalyse im Rahmen des von GRS bearbeiteten BMFT-Projekts "Testwarte" hingewiesen /3/.

| **12 Testmannschaften - 6 Szenarios** | | |
|---|---|---|
| **Auftreten des Ereignisses ➢ Handeln** | **Zeitbedarf ohne EOPTS** | **mit EOPTS** |
| **Reaktorscram** ➢ Notfall-Druckentlastung | 770 s | 153 s |
| **Reaktorwasserstand niedrig** ➢ Notfall-Druckentlastung | 263 s | 82 s |
| **Zeitgewinn für alle Tests:** | **0 - 617 s** | |
| | | |
| **Menschliche Fehler für 14 Team-Szenarios** | | |
| ohne EOPTS: **23** (meist prozedural) | davon in $\Delta t$ entdeckt: **15** | |
| mit EOPTS: **11** (meist kommunikativ) | davon in $\Delta t$ entdeckt: **3** | |

Bild 2: EOPTS zum Verfolgen von Prozeduren, Ergebnisse von Simulatortests /2/

### 2.3 Diagnose- und Prognosesysteme

Derzeit entwickeln sich die Unterstützungssysteme - vor allem wegen der zunehmenden Automatisierung - in Richtung Diagnose- und Prognosesysteme, die sich der für den Operateur sehr schwierigen Aufgabe zuwenden

- Abweichungen vom Normalbetrieb in einem sehr frühen Stadium zu erkennen,
- Prognosen über den weiteren Verlauf der Störung durchzuführen und
- die Wirkung geplanter Gegenmaßnahmen per Simulation zu testen.

Der Nutzen solcher Systeme ist unverkennbar, allerdings erfordern sie, ausgehend von einer intensiven Untersuchung der Prozeßdynamik

- eine Nachbildung des Normalverhaltens auf dem Rechner, um Abweichungen feststellen zu können,

- ❑ eine verfeinerte Meßwertverarbeitung, um prozeßbedingte Meßwertschwankungen von echten Störungen unterscheiden zu können und
- ❑ die Möglichkeit des Vergleichs mit allgemeinen Betriebserfahrungen sowie mit a priori ausgeführten Anlagen- und Transientenanalysen.

Um mit derartigen Aufgabenstellungen fertig zu werden, bedarf es des Einsatzes spezieller Methoden, die von der qualitativen Simulation bis zur Anwendung von Expertensystemen reichen. Wichtig dabei ist, daß dem Benutzer die Arbeitsweise des Diagnose- und Prognosesystems transparent bleibt. Dies wird durch die sog. Erklärungskomponente erreicht, d.h. es wird genau dargestellt, aufgrund welcher Prämissen und Randbedingungen, meist unterstützt durch Systemdarstellungen und Diagramme, das System zu einer bestimmten Diagnose oder Prognose gekommen ist. Der Operateur kann somit die zur Verfügung gestellten Informationen akzeptieren oder verwerfen.

### 2.3.1 Systeme zur Prozeßdiagnose

Eine Möglichkeit für Prognosen über weitere Entwicklungen von Störfällen ist die on-line Anwendung von Ereignisablaufdiagrammen, wie sie in Risikostudien verwendet werden. Durch die Wahrscheinlichkeitsbewertung der einzelnen Pfade ist es dabei sogar möglich, Hinweise auf die wahrscheinlichste Weiterentwicklung eines Störfallszenarios zu geben. Ein im Rahmen des BMFT-Projekts "Testwarte" von GRS entwickelter Prognosemodul macht die Ereignisablaufdiagramme während der Simulation des Störfalls (in der Praxis während des Betriebs) verfügbar und gibt on-line über den jeweiligen Anlagenzustand Auskunft /4/. Weiter werden Vorschläge zum Risikomanagement geboten, die u.a. Reparaturprioritäten oder Schaltungsänderungen beinhalten. Risiko wird dabei als die Häufigkeit verstanden, mit der ein bestimmter Schadenszustand eintreten kann. Beim Betrieb einer Anlage sind verschiedene Risiken gegeben, z.B. Produktionsausfall, Schaden an der Anlage, Personenschaden, Umweltschaden. Durch eine diesen Risiken entsprechende Modellierung kann das Prognosemodul für das jeweilig zugehörige Konfigurationsmanagement entwickelt und eingesetzt werden.

Als Beispiel für ein fortschrittliches wissensbasiertes Diagnose- und Prognosesystem, das in naher Zukunft in DWR-Anlagen eingebaut werden soll, sei eine Entwicklung von Mitsubishi genannt, die Ende 1992 mit einem voll ausgebauten Prototyp abgeschlossen wurde /5/. Es stellt im Fall von auftretenden Störungen oder Störfällen folgende Funktionen bereit:

- ❑ Überwachen der Aktionen automatische Einrichtungen
- ❑ Frühzeitiges Erkennen von Fehlern
- ❑ Diagnose der Ursachen
- ❑ Verfolgen der vom System empfohlenen Eingriffe.

Bemerkenswert sind die methodischen Ansätze, mit deren Hilfe zwei wesentliche Probleme von Unterstützungssystemen gelöst werden, erstens die Erzeugung einer genügend umfangreichen und detaillierten Wissensbasis (deep knowledge) und zweitens die Aussagesicher-

heit des Systems. Mit Hilfe eines hierarchisch aufgebauten Modells zur Darstellung abnormaler Anlagenzustände werden auch nicht vorhergesehene Störungen abgedeckt und damit die Abhängigkeit von einer etwa unzureichenden Wissensbasis weitgehend vermieden. Die Diagnosen werden auf der Basis eines Hypothese/Test-Verfahrens gestellt. Ist eine Anomalie detektiert, dann werden durch das System die dafür möglichen verantwortlichen Fehler bzw. Fehlerszenarien ermittelt. Durch ein ausgeklügeltes Verifikationsverfahren werden diese Fehlerszenarien schrittweise reduziert, so daß schließlich die Fehlerquellen mit hoher Aussagesicherheit angegeben werden können.

### 2.3.2 Systeme zur Diagnose des machanischen Anlagenzustands

Ein weiteres, ohne Einsatz von digitaler Rechentechnik nicht mögliches Anwendungsgebiet stellt die Diagnose des mechanischen Anlagenzustandes dar. Hier haben sich - schon seit den 70er Jahren - Systeme zur Detektion loser oder lockerer Teile sowie zur Überwachung des mechanischen Schwingungsverhaltens von Komponenten des Primärkreises entwickelt. Sie werden heute in Leichtwasserreaktoranlagen mit Erfolg eingesetzt. Typisch für die hier angewendeten Methoden ist die Analyse stochastischer Signale aus der Anlage, z.B. Korrelationsanalyse im Zeit- oder Frequenzbereich, Mustererkennung, u.ä.

Durch Einsatz von Rechnertechnik vor Ort ist es heute möglich, einen Großteil der Analysen on-line durchzuführen und die Ergebnisse der Diagnose in übersichtlicher Form darzustellen. Dabei werden z.B. zur Überwachung der vier Hauptkühlmittelpumpen bei einem Erfassungstakt der sechzehn Meßsignale von 90 Minuten ca. 7.500 gemittelte Leistungsdichtespektren im Monat errechnet und in vier Langzeittrend-Darstellungen dem Benutzer vor Ort zur Verfügung gestellt /6/. So wird in modernen Systemen auch bei Anwendung sehr aufwendiger Analyseverfahren die automatische Überwachung von bestimmten Merkmalen (z.B. Lage, Form und Leistung von Resonanzen) oder die Information über das Langzeitverhalten wichtiger Merkmale einschließlich der Angabe von zulässigen Bereichen möglich gemacht. Verläßt ein Merkmal diesen Bereich, wird Alarm gegeben. Die eigentliche Diagnose erfolgt dann durch Interpretation der gespeicherten Daten durch den Spezialisten.

Aufgrund der auflaufenden Erfahrungen wird es Schritt für Schritt möglich sein, das Wissen über die Interpretation von Signalen so zu erweitern, daß in Zukunft Diagnose- und Prognoseergebnisse auch unmittelbar vor Ort verfügbar gemacht werden können. Eine Erweiterung dieser Methoden auf bisher nicht in die Diagnose einbezogene sicherheitstechnisch wichtige mechanische Komponenten erscheint zweckmäßig, auch im Hinblick auf eine Verbesserung der Aussagekraft von Wiederholungsprüfungen. Damit können ganz wesentliche Informationen für die Planung von Ersatzteilbeschaffungen und Reparaturmaßnahmen gewonnen werden, die dem Betrieb und der Sicherheit in gleicher Weise dienen. Derartige Planungen sind mit Hilfe von Rechnersystemen wesentlich effizienter durchführbar. Derzeit werden weltweit Betriebsführungssysteme eingeführt, die mit verteilten Rechnernetzen aufgebaut sind, und alle nur erdenklichen Benutzerbedürfnisse erfüllen. Diese Systeme arbeiten mit einer Datenbasis, die Informationen über Personal, Finanzen, Wartung, Ersatzteilhaltung und Betrieb (letztere vom Anlagenrechner ausgekoppelt) enthält.

### 2.3.3 Sicherheitsgewinn durch Prognose und Diagnose

Bei fortschreitender Automatisierung der Anlagen wird die letztlich durch die Betriebsmannschaft gebildete Redundanz durch Einsatz der neuen Informationstechnik gewährleistet, weil damit eine große Transparenz des Anlagengeschehens erreicht wird. Das Abbilden von Aufgaben statt des Abbildens von Systemen in der Warte erfordert einen Verarbeitungsgrad der Meßsignale, der nur mit der Digitaltechnik erreichbar ist. Dabei werden die oben diskutierten Unterstützungssysteme, vor allem aber Diagnose- und Prognoseverfahren, in derzeit in Entwicklung befindlichen Wartenkonzepten a priori integriert, so daß eine Zusammenfassung mit den tranditionellen Informationsarten erfolgt. Als Beispiel seien hier die N4-Warte (Frankreich) oder die Cockpit-Warte von Siemens/KWU genannt /7/. Der Sicherheitsgewinn kann zusammenfassend wie folgt beschrieben werden:

- Unterstützung des Anlagen- und Prozeßverständnisses bei Störungen durch Dignose- und Prognoseverfahren,
- Möglichkeit des Austestens von Gegenmaßnahmen durch Simulation vor Ort, und in Verbindung mit den Warten der neuen Generation
- Verbesserung des Anlagen- und Prozeßverständnisses durch Abbilden von Aufgaben.

## 3. Zuverlässigkeit von Hard- und Software

Der in den vorhergehenden Abschnitten diskutierte Sicherheitsgewinn durch die Bereitstellung von Informationen mit erhöhtem Informationsgehalt setzt natürlich eine hohe Zuverlässigkeit von Hard- und Software der neuen Informationstechnik voraus. Wenn auch der Einsatz von Digitaltechnik mit digitalen Rechnern neue Fragestellungen aufwirft, im Grunde sind dieselben Maßnahmen wie bei konventionellen Systemen zu ergreifen, um die erforderliche Gesamtzuverlässigkeit über die Lebenszeit zu erzielen, also

- klare verfahrenstechnische Aufgabenstellung,
- transparente Umsetzung in die Geräte- und Systemtechnik,
- detaillierte und übersichtliche Dokumentierung für den Änderungsdienst sowie
- durchgängige Wartung und Reparaturstrategien.

Eine auch nur einigermaßen vollständige Diskussion von Fragen der Zuverlässigkeit, Qualifizierung und Qualitätssicherung würden den Rahmen dieses Beitrags sprengen; im folgenden nur einige Anmerkungen zur System- und Softwarezuverlässigkeit:

- **Zuverlässigkeit des Systems**
  Hohe Systemzuverlässigkeit wird durch redundante und diversitäre Strukturen erreicht, und zwar sowohl durch Verwendung paralleler Rechner als auch paralleler Übertragungswege. Die Anwendung von verteilten Rechnersystemen ermöglicht die Aufteilung von Aufgaben unter dem Gesichtspunkt der Diversifizierung und damit die Verringerung der Wahrscheinlichkeit von Totalabstürzen. Systeme zur Erzeugung si-

cherheitstechnisch besonders wichtiger Informationen können mit höherer Zuverlässigkeitsstufe ausgelegt werden.

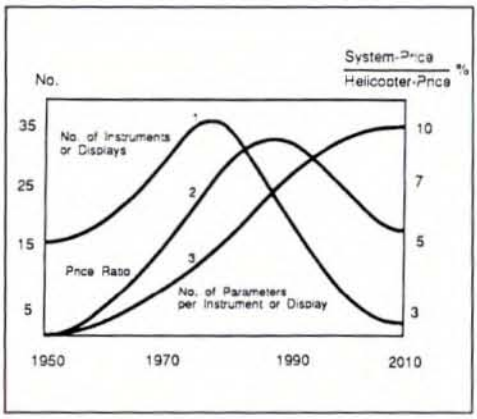
- **Zuverlässigkeit der Software**
  Hohe Zuverlässigkeit der Software wird durch einen schrittweisen, nachvollziehbaren Herstellungsprozeß von der verfahrenstechnischen Aufgabendefinition bis zum fertigen Code erreicht. Dabei erlauben diese Schritte eine weitgehende formale (mathematische) Darstellungsweise, so daß die Umsetzung von einer Herstellungsphase in die nächste genau nachvollzogen werden kann. In den meisten Fällen werden dafür Softwaretools eingesetzt, sodaß eine möglichst fehlerfreie und vollständige Prüfung sichergestellt ist. Dieses schrittweise Vorgehen ist auch notwendig, damit bei späteren Erweiterungen oder Änderungen des Codes keine Fehler eingeschleppt werden. Darüberhinaus können für höchste Zuverlässigkeitsansprüche Auslegungsmaßnahmen ergriffen werden, das heißt:
  - Ermittlung des Prozeßzustandes aufgrund unterschiedlicher physikalischer Meßgrößen, die in den Rechnern dann zwangsläufig mit unterschiedlichen Algorithmen bzw. Codes behandelt werden.
  - Verwendung unterschiedlicher physikalischer Zusammenhänge (und damit Algorithmen) für die Erzielung ein- und desselben Informationsbedürfnisses.
  - Anwendung unterschiedlicher mathematischer Lösungsansätze.

Man spricht in diesem Zusammenhang auch von funktionaler Diversität der Software, die ihrerseits auch einen wesentlichen Beitrag zur Bekämpfung von systematischen Fehlern der Rechnerhardware leistet: Wird ein- und derselbe Sachverhalt mit unterschiedlichen Codes errechnet, würden auch bei Anwendung gleicher Rechner unterschiedliche Bereiche der Hardware gefordert. Ein gleichzeitiger Ausfall mehrerer Rechner aufgrund eines systematischen Hardwarefehlers ist äußerst unwahrscheinlich.

## 4. Neue Informationstechnik in der Avionik (zwei Beispiele)

### 4.1 Digitales Informationssystem für Hubschrauber

Wie im Lauf meines Vortrags mehrfach betont, führt die Neue Informationstechnik zu einer erheblichen Kondensation der Information. Dies hat sich in den Kernkraftwerkswarten noch nicht so deutlich ausgedrückt wie etwa in der Avionik. Hier zeigt eine Untersuchung von Eurocopter, daß etwa seit 1980 ein eindeutiger Trend der Reduktion von Einzelanzeigen und Displays zu verzeichnen ist (Bild 3 links, Kurve 1); und dies unter Berücksichtigung der Tatsache, daß je nach Komplexität der Anforderungen mit den zu deren Beherrschung notwendigen Systemen der Informationsbedarf zugenommen hat /7/. Durch Einführung der neuen Informationstechnik ist es also trotzdem gelungen, erfolgreich gegenzusteuern. Dies zeigt die linke Darstellung in Bild 3. Hier ist eine Nivellierung der Abhängigkeit des Schwierigkeitsgrades der Mission von der Anzahl der Anzeigen und Displays bzw. Steuerungsmodule zu erkennen.



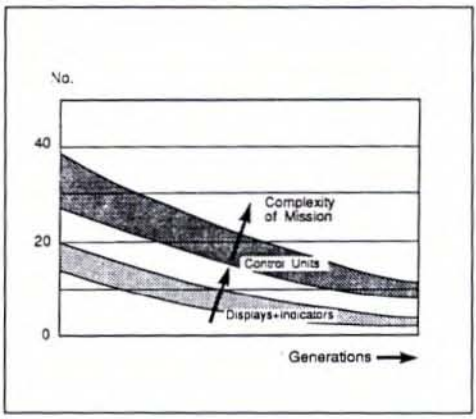




Bild 3: Analyse von Instrumentierungen /8/

Der Sicherheitsgewinn spiegelt sich in einer markanten Vereinfachung der Mensch-Maschine-Schnittstelle auch bei höchsten Anforderungen wider.

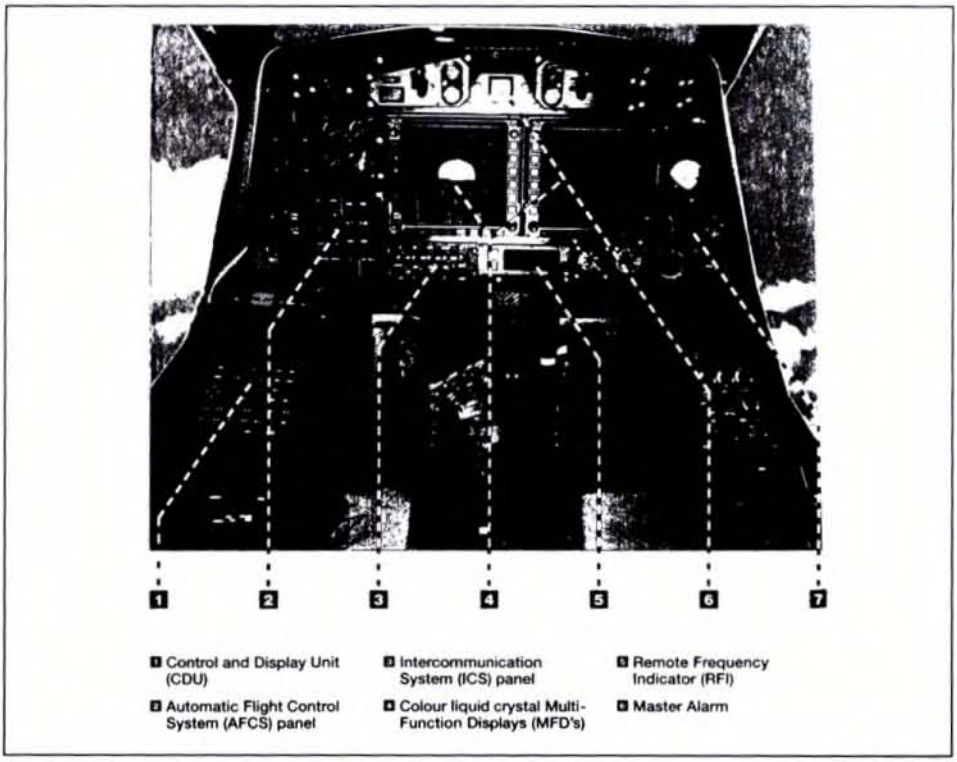



Bild 4: Cockpit eines Helikopters /8/

In Bild 4 ist das Cockpit (hier der Sitzplatz des Piloten) eines Hubschraubers ausgerüstet mit dem derzeit modernsten Leit- und Informationssystem TIGERS gezeigt, von dem derzeit drei Prototypen im Einsatz sind /7/. Hervorzuheben sind das Zentralinstrument 4, in dem alle für den Piloten wichtigen Informationen zusammengefaßt sind, sowie die Anzeigetafel 6 "Master Alarms", die auf einem Blick für die Sicherheit des Flugzeugs relevante Grenzwertüberschreitungen widergibt. Zum Informationsteil von TIGERS sei noch erwähnt:

- Die Meßsignale gehen über zwei "Datensammler" (Remote Terminal Units) auf zwei redundante Bussysteme.
- Über jedes Bussystem sind rund 4.700 Parameter abzuarbeiten.
- Die Information wird auf vier Bildschirmen konzentriert.
- Jeder Bildschirm hat die gleichen Möglichkeiten von Darstellung bzw. Bedienung.
- Zur Stromversorgung werden zwei unabhängige, galvanisch getrennte Systeme verwendet.

Darüber hinaus gibt es eine "Notsteuerstelle", d.h. für sehr kritische Daten sind diskrete Leitungen zu einem unabhängigen Warnsystem vorhanden, das auch bei Totalausfall der o.g. Stromversorgung über Batterien versorgt wird.

### 4.2 Digitales Informationssystem für Passagierflugzeuge

Das "Flight by Wire-Prinzip", das heißt Ersatz der mechanischen und hydraulischen Systeme durch elektrische Antriebe, die von Digitaltechnik überwacht und gesteuert werden, ist beim Airbus 320 durchgehend umgesetzt /9, 10/. Die Information von Pilot und Copilot im Cockpit erfolgt über vier Bildschirme (Bild 5). Die Größe der Schirme erlaubt die Darstellung aller sogenannten Basis-T-Informationen (Fahrt, Lage, Höhe, Kurs) auf einem Schirm. Der Schirm daneben enthält alle für die Navigation notwendigen Informationen. Beide Schirme sind direkt im Blickfeld der Piloten. Die in der Mitte des Cockpits übereinander liegenden Bildschirme informieren über den Zustand der Flugsysteme einschließlich der Triebwerke. Die Informationsinhalte sind situationsabhängig, das heißt es werden automatisch immer jene Informationen gezeigt, die im Augenblick gerade wichtig sind. Mit diesen Maßnahmen ist zweifellos ein sehr hoher Grad in der Informationszusammenfassung erreicht, der dadurch an der Schnittstelle Mensch-Maschine erzielte Sicherheitsgewinn erheblich.

Noch ein paar Worte zum Systemaufbau: Er folgt dem Prinzip der Diversität, das heißt in redundanten Systemen werden Rechner unterschiedlicher Hersteller für ein- und dieselbe Steuerfunktion, nach Möglichkeit noch mit unterschiedlichen Stellgliedern eingesetzt. Für den äußersten Notfall des Ausfalls des Bordnetzes steht eine Standby-Instrumentierung in konventioneller Ausführung zur Verfügung, als "eiserne Reserve" lassen sich auf herkömmliche mechanische Art die Seitensteuerung und die Höhentrimmung betätigen.

Bild 5: Cockpit des Airbus A320 /9/

Ausgehend von einem Computerausfall nach durchschnittlich 4.000 bis 5.000 Betriebsstunden ermittelt der Hersteller für den Totalverlust der elektronischen Steuerung einen Wert von kleiner $1 \times 10^{-5}$/Jahr, wobei in diesem Fall die o.g. Noteinrichtungen zum Tragen kämen.

## 5. Zusammenfassung

Anhand mehrerer Beispiele wurde gezeigt, mit welchen Methoden die neue Informationstechnik eine bedeutend bessere Anbindung des Operateurs an das Anlagengeschehen ermöglicht als das bisher der Fall war. Wesentlich dabei ist der durch den Einsatz von Digitaltechnik erst möglich gemachte Übergang von der systemorientierten zur aufgabenorientierten Information. Dabei erfolgt durch Einsatz von rechnergestützten Diagnose- und Prognoseverfahren eine ganz wesentliche Stützung des mentalen Bildes des Anlagengeschehens, vor allem in komplexen und unübersichtlichen Situationen. Der dadurch zu erzielende Sicherheitsgewinn ist unübersehbar; hier sei erinnert an

- Zeitgewinn bei der Beurteilung einer Anlagensituation,
- Prognosen über mögliche Entwicklungen einer Störung oder
- Unterstützung bei der Anwendung von Prozeduren.

Die Möglichkeiten der neuen Informationstechnik sind bestimmt noch nicht ausgeschöpft. Insbesondere Entwicklungen unter dem Einsatz von Expertensystemen, neuronalen Netzen, u.ä. stehen noch am Anfang. Es ist wichtig, daß auch die Kerntechnik diese, einen enormen Informationsgewinn bringenden Methoden sinnvoll nutzt. Den Stand von Wissenschaft und Technik halten heißt auch, die neue Informationstechnik einzusetzen und durch Nutzen ihrer Vorteile die Sicherheit der Anlagen zu erhöhen.

## Literatur


/1/ R. HEINBUCH
Erkenntnisse aus dem Betrieb mit bildschirmgestützter Informationsdarstellung und resultierende Anforderungen an zukünftige Warten in Kernkraftwerken. Fachsitzung JK 92; Mensch-Maschine Kommunikation

/2/ B. SUN, D. CAIN, A.J. SPURGIN, D.D. ORVIS, J.F. CHENG, R. CHIANG
Human Factored Control Room Operator Evaluation of an Automated Emergency Operating Procedure Expert System. IAEA-SM-315/38

/3/ D. BERAHA, H. JAHN, O. LUPAS, T. VOGGENBERGER
Extended Support for Accident Analysis in the Test Control RoomKerntechnik 58 (1993) No. 2, Carl Hanser Verlag, München 1993

/4/ P. KAFKA, O. LUPAS, J. WU, M. ZIMMERMANN
A Computer Aid for Safety Assessment and Configuration Management of Complex Systems based on PSA Models. "PSAM-II, 20.-24. März 1994 in San Diego

/5/ Y. FUJITA, M. TOHYAMA, I. YANAGISAWA, T. IDA, H. ARIKAWA
Designing a Knowledge-Based Operator Support System for Practical Applications. Nuclear Technology Vol.95, July 1991

/6/ R. SUNDER, D. WACH
Betriebsnahe Aspekte beim Einsatz von Überwachungs- und Diagnosesystemen. High Serve '90, Service für Kerntechnik, 23./24. Okt. 1990, Bonn

/7/ W. HINZ, C. ARNOLDT, C. HEßLER
Screen-Based Process Control in Nuclear PlantsKerntechnik 58 (1993) No. 2, Carl Hanser Verlag, München 1993

/8/ Informationen von EUROCOPTER (Aerospatiale und Deutsche Aerospace) Sept. 1993

/9/ Das Cockpit, Deutsche Airbus 1991

/10/ S. MOSER
Der neue Airbus 320. Bild der Wissenschaft 3-1987

# Einbeziehung schwerer Störfälle in die Auslegung des Sicherheitseinschlusses neuer Reaktoren

**K. Wolfert, J. Rohde**

## 1. Einleitung

Zur Zeit wird weltweit an der Entwicklung von neuen Kernreaktoren gearbeitet. Hierbei werden im wesentlichen zwei Entwicklungslinien, gekennzeichnet als "evolutionäre" oder "innovative" Konzepte, verfolgt.

"Evolutionäre" Konzepte stellen eine gezielte Weiterentwicklung bewährter Reaktortypen dar. Hierbei können die Erkenntnisse aus mehrjähriger Betriebserfahrung genutzt werden.

"Innovative" Konzepte lösen sich von den bisher gebauten Reaktortypen und sind zum Teil durch völlig neue Lösungsansätze gekennzeichnet. Charakteristisch für diese Entwicklungslinie ist der verstärkte Einsatz passiver Systeme.

Während die Vor- und Nachteile der beiden Entwicklungskonzepte zum Teil durchaus unterschiedlich bewertet werden, besteht weitestgehend Übereinstimmung über die sicherheitstechnische Anforderung an neue Reaktoren.

## 2. Sicherheitstechnische Anforderungen

Für die nächste Generation von Kernkraftwerken wird eine neue Qualität der Reaktorsicherheit verlangt. Hierbei steht die Forderung im Mittelpunkt, eine Beeinträchtigung der Bevölkerung durch radioaktive Strahlenbelastungen praktisch auszuschließen. Daraus ergibt sich, daß technische Voraussetzungen zu schaffen sind, wodurch selbst bei schweren Unfällen mit erheblicher Beschädigung oder Schmelzen des Reaktorkerns keine einschneidenden Katastrophenschutzmaßnahmen außerhalb des Anlagengeländes erforderlich werden.

Zur Realisierung dieser Zielsetzung ist das gestaffelte Sicherheitskonzept, welches auf mehreren Schutzebenen und Barrieren gegen die Freisetzung von radioaktiven Stoffen basiert, weiterzuentwickeln.

Hierfür werden, abhängig vom jeweiligen Reaktorkonzept, unterschiedliche Ansätze gewählt. So liegt zum Beispiel bei der Weiterentwicklung von gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren der Schwerpunkt auf der verstärkten Absicherung der ersten Barriere, das heißt der Verminderung einer möglichen Freisetzung von Spaltprodukten aus der Brennstoffkonfiguration, während bei den Leichtwasserreaktoren, zusätzlich zur weiteren Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Kernschmelzunfalles, die erweiterte Sicherung der Rückhaltefunktion des Sicherheitseinschlusses im Vordergrund der Entwicklungsarbeiten steht.

In den folgenden Ausführungen wird auf die Weiterentwicklung von Leichtwasserreak- toren näher eingegangen. Hierbei werden technische Lösungsansätze zur Verstärkung der Funtion des Sicherheitseinschlusses, die zur Zeit diskutiert werden, einbezogen.

## 3. Grundlagen der Neuentwicklungen

Die heute weltweit meistgenutzte Technologie der Leichtwassereaktoren ist das Ergebnis einer jahrzehntelangen Erfahrung aus Forschung, Entwicklung, Herstellung und Betrieb. Die Weiterentwicklung des Leichtwasserreaktor-Konzeptes kann sich daher auf eine bewährte Technik abstützen.

Für den Bereich des Normalbetriebs und betrieblicher Störungen stehen umfassende Erkenntnisse aus der Betriebsauswertung zur Verfügung. Die hierbei erkannten Schwächen des Konzeptes können bei neuen Reaktoren bereits bei der Konzeption der Systemauslegung vermieden werden.

Weiterhin kann für die systematische Verbesserung der Systemtechnik zur Beherrschung von Stör- und Unfällen auf Ergebnisse vielfältiger Experimente und analytischer Untersuchungen zurückgegriffen werden. Für den Bereich der Auslegungsstörfälle liegen experimentelle Daten und Analyseergebnisse aus mehr als zwei Jahrzehnten vor.

Der Bereich auslegungsüberschreitender Störfälle wurde durch die Einführung anlageninterner Notfallschutzmaßnahmen, als einer zusätzlichen Sicherheitsebene, breitbandig und intensiv untersucht. Probabilistische Sicherheitsanalysen zeigen eindrucksvoll den mit anlageninternen Notfallschutzmaßnahmen erzielbaren Sicherheitsgewinn.

Forschungsarbeiten zu den Phänomenen schwerer Unfälle einschließlich derjenigen, die zu einem vollständigen Kernschmelzen führen, wurden seit Beginn der Reaktorsicherheitsforschung parallel zu den Untersuchungen zur Problematik der Auslegungsstörfälle durchgeführt. Die Analyse unfallbedingter Phänomene und ihrer möglichen Auswirkungen erlangte dabei in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. Diese Entwicklung wurde sowohl durch die Unfälle in den Reaktoranlagen von TMI und Tschernobyl als auch durch die Forderung nach Berücksichtigung schwerer Unfälle bei der Auslegung neuer Reaktoren forciert.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die vorliegenden Betriebserfahrungen und die Erkenntnisse aus Forschungs- und Entwicklungsvorhaben eine ausgewogene Grundlage für die Entwicklung eines neuen Leichtwasserreaktors darstellen.

## 4. Auslegung des Sicherheitseinschlusses

Die Anforderung an neue Reaktoranlagen, auch im Falle eines schweren Unfalles mit Kernschmelzen die radiologischen Auswirkungen weitestgehend auf die Anlage zu beschränken, stellt höchste Ansprüche an die Rückhaltefunktion des Sicherheitseinschlusses.

Dem Schutzziel "Erhaltung der Integrität des Sicherheitsbehälters" kommt deshalb bei neuen Reaktorkonzepten eine besondere Bedeutung zu.

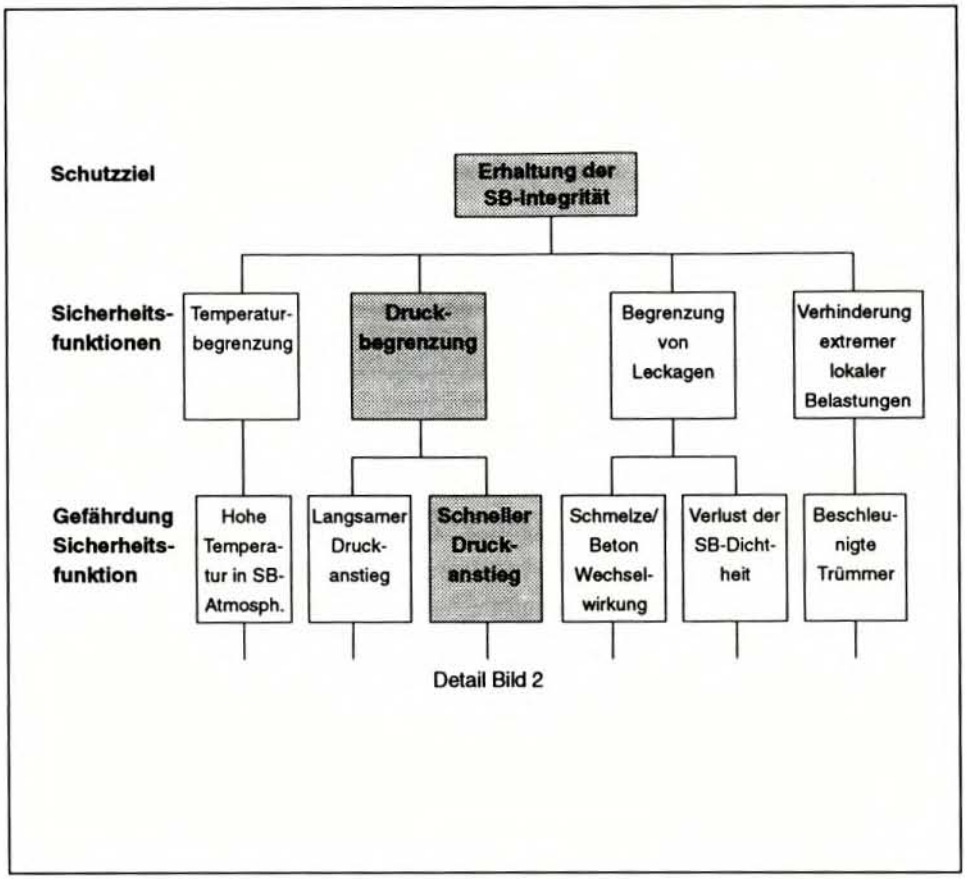



Bild 1: DWR-Schutzzielbaum "Erhaltung der SB-Integrität"

Ausgehend von diesem Schutzziel sind dessen Gefährdungen ableitbar. Im einzelnen sind dieses:

- hohe Temperaturen in der SB-Atmosphäre
- ein schneller bzw. langsamer Druckanstieg
- eine langzeitige Schmelze-Beton-Wechselwirkung, sowie
- die Entstehung beschleunigter Trümmer.

In einem weiteren Schritt können den Gefährdungen die maßgebenden Mechanismen zugeordnet werden.

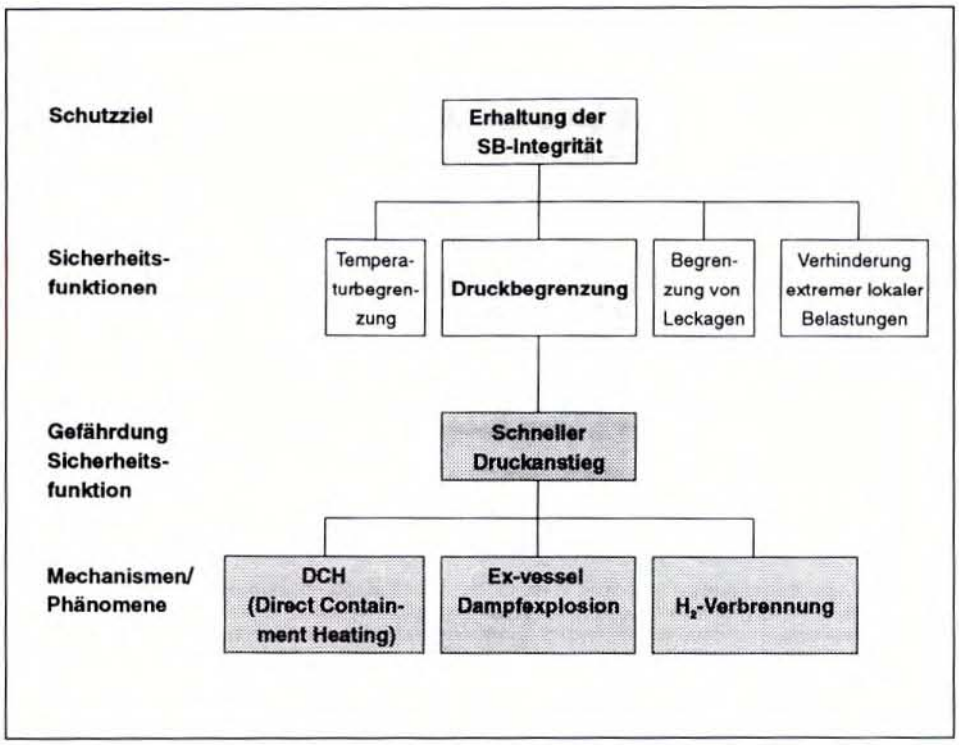



Bild 2: Teil eines DWR-Schutzzielbaumes

In Bild 2 wird dies anhand der Gefährdung "schneller Druckanstieg" exemplarisch aufgezeigt. Die Mechanismen sind hierfür:

- Aufheizung der Atmosphäre des Sicherheitsbehälters durch feinfragmentierte Schmelzepartikel (DCH)
- Ex-Vessel Dampfexplosion und
- $H_2$-Verbrennung.

Derartige Mechanismen bzw. Phänomene müssen daher hinsichtlich ihrer Beherrschung bei der Auslegung des Sicherheitsbehälters neuer Reaktoren berücksichtigt werden. Grundsätzlich können hierfür zwei Strategien verfolgt werden:

- entweder lastengenerierende Phänomene im Sicherheitsbehälter durch eine zielgerichtete konstruktive oder verfahrenstechnische Vorsorge zu verhindern bzw. deren Auswirkungen zu begrenzen und der Auslegung die verbleibenden Lasten zugrunde zu legen, oder
- die Verstärkung des Sicherheitsbehälters mit dem generellen Ziel einer höheren Lastabtragbarkeit in den Vordergrund zu stellen.

Wir vertreten hierzu die Auffassung, daß unfallbedingte Belastungen vorrangig durch konstruktive oder verfahrenstechnische Maßnahmen verhindert oder in ihrer Intensität bzw. Höhe begrenzt werden sollten. Die konstruktive Auslegung zur Abtragbarkeit von Extrem-Lasten sollte nur in Erwägung gezogen werden, wenn unfallbedingte Phänomene in ihren Auswirkungen nicht beeinflußt werden können.

Ein sicherer Einschluß der Aktivitäten im Sicherheitsbehälter, auch unter den Bedingungen schwerer Unfälle, erfordert neben der Berücksichtigung unfallbedingter Phänomene und deren Auswirkungen die Gewährleistung der Dichtheit des Sicherheitsbehälters und die Verhinderung sogenannter Bypaß-Szenarien.

Dies bedeutet im einzelnen:

- Die Dichtheit des Sicherheitseinschlusses bezüglich der möglichen Freisetzung radioaktiver Stoffe ist so zu erhöhen, daß selbst bei Unfällen mit Kernschmelzen die Notwendigkeit für Evakuierungs- oder Umsiedelungsmaßnahmen nicht gegeben ist. Ein Lösungsansatz hierfür ist z. B. der Einsatz eines doppelschaligen Sicherheitsbehälters mit gefilterter Absaugung des Ringraumes sowie einer zuverlässigen, ständigen Überwachung der Dichtheit.
- Bypaßpfade, d. h., direkte Leckagewege heraus aus dem Sicherheitseinschluß über die Sekundärseite der Dampferzeuger oder über die am Primärkreislauf angeschlossenen und aus dem Sicherheitsbehälter herausführenden Systeme müssen praktisch eliminiert werden. Lösungsansätze sind z. B. die konsequente Minimierung der aus dem Sicherheitsbehälter nach außen führenden Leitungen, und in den Fällen, wo diese aus praktischen Gründen nicht zu vermeiden ist, diese in periphere Gebäude zu führen, die einen sicheren Einschluß ermöglichen. Weitere Lösungsansätze bestehen in der Auslegung derartiger Leitungen auf Primärkreisdruck sowie dem Einsatz redundanter und/oder diversitärer Armaturen zur Sicherstellung einer zuverlässigen Absperrfunktion.

Grundsätzlich sind, wie zum Teil bereits erläutert, bei der Auslegung des Sicherheitsbehälters die nachfolgend aufgelisteten Phänomene zu berücksichtigen:

- Die Entstehung brennbarer Gasgemische und deren Verbrennung,
- die Aufheizung der Atmosphäre des Sicherheitsbehälters als Folge des Austreibens und einer möglichen Fragmentation von Schmelze nach Versagen des Reaktordruckbehälters,
- die Wechselwirkung Schmelze-Wasser in der Reaktorgrube (Dampfexplosion),
- die Wechselwirkung Schmelze-Beton in der Reaktorgrube (Betonerosion),
- der Druckaufbau im Sicherheitsbehälter aufgrund der freigesetzten Nachzerfallswärme.

Die aufgeführten Phänomene bzw. Vorgänge sollen im folgenden näher betrachtet werden. Hierbei werden jeweils das Problem kurz beschrieben und technische Lösungsansätze, die zur Zeit diskutiert werden, aufgezeigt.

## 4.1 Wasserstoffverbrennung

**Problemstellung**

- ❑ Unfallbedingte Oxidation hochaufgeheizter Metallstrukturen und Radiolyse von Wasser führen zur Bildung von Wasserstoff.
- ❑ Wasserstoffverbrennungen können die Integrität des Sicherheitsbehälters gefährden.

**Stand des Wissens**

Zu diesem Problemkreis werden weltweit experimentelle und analytische Arbeiten durchgeführt. Es soll hier insbesondere auf die Groß-Experimente an der HDR- Anlage in Karlstein /1/ und im Battelle-Containment in Frankfurt /2/ hingewiesen werden. Im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie wurden dort jeweils mehrere Versuchsreihen durchgeführt.

Mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen konnte der Kenntnisstand über Verbrennungsabläufe in unterschiedlichen Geometrien, insbesondere in Raumketten, wesentlich erweitert werden. So lieferten diese Experimente zuverlässige Daten zur Entwicklung theoretischer Modelle zur Beschreibung der Wasserstoffverteilung und möglichen Verbrennungsabläufe in Mehrraumgeometrien sowie deren Verifikation. Weiterhin wurden umfangreiche Erfahrungen zur Entwicklung von Maßnahmen zur Beherrschung der Wasserstoffproblematik gewonnen.

Wird Wasserdampf einem Gasgemisch aus Luft und Wasserstoff beigemischt, verschiebt sich die untere Zündgrenze dieses Gasgemisches hin zu höheren Wasserstoff-Konzentrationen. So ist z. B. oberhalb eines Anteiles von 30 Vol.-% Wasserdampf eine Wasserstoffkonzentration von ; 6 Vol.-% erforderlich, damit eine Verbrennung auftreten kann. Ein derartiger, hoher Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre wirkt sich stark dämpfend auf einen Verbrennungsablauf aus. Daher führt die Verbrennung eines Wasserstoff-Luft-Dampf-Gemisches unmittelbar nach dem Erreichen zündbarer Gasgemische generell zu quasi-stationären Druckbelastungen, die bezüglich der Lastabtragung für die Strukturen des Sicherheitsbehälters einschließlich seiner Einbauten kein Problem darstellen dürften, insbesondere dann, wenn die lokalen $H_2$- Ausgangskonzentrationen 10 Vol.-% nicht wesentlich übersteigen.

Eine Aufkonzentration von Wasserstoff in der Atmosphäre eines Sicherheitsbehälters ist nur möglich, wenn nach dem Erreichen zündbarer Gemischzusammensetzungen keine Verbrennung eingeleitet wird oder wenn zeitlich begrenzt ein hoher Dampfgehalt jegliche Verbrennung verhindert (dampfinertisierte Zustände). Kommt es anschließend zu einer Kondensation des Dampfes und erfolgt keine Zündung des Gemisches unmittelbar nach dem Erreichen der Zündbarkeit, können bei Wasserstoffkonzentrationen oberhalb 10 Vol.-% hochturbulente Verbrennungsabläufe auftreten, welche sowohl die Integrität des Sicherheitsbehälters als auch seiner Einbauten gefährden. Derartige Verbrennungsabläufe können sich von einer Deflagration hin zu einer Detonation entwickeln (DDT: deflagration to detonation transition).

Während die Auswirkungen von $H_2$-Verbrennungen in geschlossenen Einzelräumen für Wasserstoff-Konzentrationen 12 Vol.-% sicher abgeschätzt werden können (adiabat isoche-

rer Verbrennungsablauf), ist die Prognose eines Verbrennungsablau-fes in Raumketten und der dabei auftretenden lokalen Belastungen mit größeren Unsicherheiten verknüpft. Maßgeblich sind hierfür unterschiedliche Gemischzusammensetzungen in einzelnen Raumbereichen und die die Flammenausbreitung beeinflussenden räumlichen Gegebenheiten, wie z. B. Raumeinbauten und Überströmöffnungen zwischen den Räumen. Bei einem derartigen Verbrennungsablauf treten generell lokal geringere Lasten auf, da der Verbrennungsvorgang in Einzelräumen zu einer Druckentlastung in die benachbarten Räume führt (vented burn). Spezifische Modellentwicklungen zur Beschreibung des Verbrennungsablaufes in Mehrraumgeometrien befinden sich bei der GRS, in Zusammenarbeit mit dem Battelle-Institut, Frankfurt und der Technischen Universität München in der Entwicklung bzw. Verifikationsphase.

Aus dem erläuterten Sachverhalt ist direkt ableitbar, wenn eine Wasserstoffverbrennung nicht grundsätzlich verhindert werden kann, daß ein Aufbau lokaler Wasserstoffkonzentrationen durch vorzusehende Maßnahmen auf Werte unterhalb 10 Vol.-% begrenzt werden sollten.

Zur Beherrschung der durch die Wasserstoffbildung bedingten Gefahrensituation für den Sicherheitsbehälter befinden sich folgende Lösungsansätze in der Diskussion:

- Eine geeignete konstruktive Gestaltung der Einbauten im Sicherheitsbehälter zur Verhinderung lokal erhöhter Aufkonzentrationen von $H_2$, d.h. die Ausbildung von Konvektionsströmungen sollte im Hinblick auf eine gute Vermischung des Gasgemisches möglichst wenig behindert werden.
- Katalytisch wirkende Vorrichtungen für den Abbau von Wasserstoff, gegebenenfalls ergänzt durch Zünder (Dual-Konzept) zur Einleitung eines frühen und damit weniger heftigen Verbrennungsablaufes (Vermeidung von Detonation).
- Die vollständige oder räumlich begrenzte Inertisierung.

## 4.2 Aufheizung der Sicherheitsbehälteratmosphäre durch feinfragmentierte Schmelze (DCH)

**Problemstellung**

Kommt es zu einem Kernschmelzen unter hohem Systemdruck, wird nach einem Versagen des Reaktordruckbehälters im Bodenbereich die dort angesammelte Schmelze in die Reaktorgrube ausgeblasen. Der mögliche Transport fein fragmentierter Schmelzepartikel könnte zu einer kurzfristigen Aufheizung der Sicherheitsbehälter-Atmosphäre (DCH) und in Folge zu einer Druckerhöhung führen.

Eine Fragmentation und Ablagerung von Schmelze auf Strukturoberflächen würde Maßnahmen zur Kühlung von Schmelze im Sicherheitsbehälter sowie die Auslegung der Reaktorgrube/Kernfängervorrichtung beeinflussen.

**Stand des Wissens**

Die Problematik möglicher Auswirkungen eines sogenannten DCH auf den Sicherheitsbehälter wurde in den letzten 10 Jahren schwerpunktmäßig in USA und England experimentell untersucht. In den USA wurden Versuchsreihen mit Anlagen im Volumenmaßstab von etwa 1:10 und 1:40 durchgeführt /3/, /4/. Neuere Versuche in einer integralen Anlage im Volumenmaßstab 1:6 werden z.Z. durchgeführt.

Als bisheriges Ergebnis ist hervorzuheben, daß unter den gewählten Versuchsbedingungen und trotz einer relativ offenen Kavernenstruktur ein hohes Rückhaltepotential für Schmelzepartikel an den Strukturoberflächen von Einbauten der Kaverne festgestellt wurde. Dieser Effekt ist stärker ausgeprägt, wenn in den Versuchen für die Schmelze Materialien des realen Kernaufbaues berücksichtigt werden.

Maßgebend für die Auswirkungen auf die Atmosphäre des Sicherheitsbehälters (Druck- und Temperaturanstieg) waren aber der Ausgangsdruck im Druckbehälter, der Versagensmode des Reaktordruckbehälters im unteren Kalottenbereich sowie Masse und Temperatur der ausströmenden Schmelze. Bei Versuchen, in denen eine Wasservorlage unterhalb des Druckgefäßes zum Zeitpunkt des Ausblasens von Schmelze vorhanden war, wurde ein hocheffizienter Energieaustausch zwischen einer fragmentierten Schmelze und dem Wasser registriert. In einigen Fällen führte dieser Vorgang zur Ausbildung einer Dampfexplosion, die zu starken Beschädigungen an den Versuchsanlagen führte.

**Technische Lösungsansätze**

Zur Verhinderung eines erheblichen Druckanstieges im Sicherheitsbehälter durch feinfragmentierte Schmelzepartikel wird vorrangig **die frühzeitige Druckabsenkung des Systemdruckes** diskutiert.

### 4.3 Wechselwirkung Schmelze-Wasser (Dampfexplosion)

**Problemstellung**

- ❑ Nach einem Durchschmelzen des Reaktordruckbehälterbodens kann es zu einer Wechselwirkung zwischen Schmelze und Wasser in der Reaktorgrube kommen.
- ❑ Hierdurch kann kurzfristig Energie in den Sicherheitsbehälter freigesetzt werden.
- ❑ Unter ungünstigsten Randbedingungen kann eine derartige Wechselwirkung zu einer Dampfexplosion führen.

**Stand des Wissens**

Gelangen geschmolzene Kernmaterialien in Kontakt mit Wasser, kommt es zu einer Verdampfung des Wassers. Da mit der Verdampfung eine sehr starke Volumenausdehnung

verbunden ist, steigt der Druck an. Der Druckanstieg ist um so heftiger, je intensiver und rascher die Wärme aus der heißen Schmelze an das Wasser abgegeben wird. Im Extremfall werden durch die schnelle Verdampfung Druckwellen erzeugt. Dieser Vorgang wird als Dampfexplosion bezeichnet.

Eine Dampfexplosion ist jedoch nur dann möglich, wenn die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:

- Hinreichend homogene Vorvermischung zwischen Schmelze und Wasser (**"premixing"**) innerhalb weniger Sekunden
- Feinfragmentation der Schmelze mit einem Teilchendurchmesser zwischen $10^{-6}$ und $10^{-3}$ m ("Kontaktflächenbedingung") und hinreichend langer und inniger Kontakt mit dem Wasser (**"Kontaktzeitbedingung"**)
- Feinfragmentation innerhalb einiger hundertstel Sekunden, um eine gleichzeitige Reaktion der beteiligten Massen zu erreichen (**"Kohärenzbedingung"**)

Sind diese Bedingungen nicht gleichzeitig erfüllt, kann es zwar zu einer raschen Verdampfung oder auch zu einer begrenzten Dampfexplosion kommen, wodurch jedoch nicht zwangsläufig eine Gefährdung umgebender Strukturen gegeben ist.

Für die Bewertung der Wechselwirkung zwischen Kernschmelze und Wasser sind vor allem die experimentellen Untersuchungen mit Schmelzmassen im Kilogramm-Bereich in den Forschungszentren Sandia in den USA /5/ und in Winfrith, Grobritannien /6/, von Bedeutung.

Bei der Übertragung der Erkenntnisse aus diesen Versuchen auf reale Bedingungen mit Kernschmelzmassen im Bereich von einigen Tonnen spielen die Fragmentation dieser Kernschmelzmassen und die Kohärenz bei der Wärmeübertragung eine bedeutende Rolle. In der wissenschaftlichen Diskussion zur Fragmentation großer Kernschmelzmassen besteht prinzipiell Übereinstimmung, daß der Anteil der Kernschmelze, der sich mit dem Kühlmittel ausreichend vermischen läßt, mit zunehmender Schmelzmasse abnimmt. Die an der Wechselwirkung beteiligte Kernschmelzmasse kann bis zu einem Faktor zehn geringer als die verfügbare Masse sein. Damit wird auch die freigesetzte mechanische Energie deutlich verringert.

**Technische Lösungsansätze**

Durch konstruktive oder verfahrenstechnische Maßnahmen wird sichergestellt, daß sich zum Zeitpunkt eines Versagens des Reaktordruckbehälters kein Wasser unterhalb des Reaktordruckbehälters befindet.

### 4.4 Schmelze-Beton-Wechselwirkung

**Problemstellung**

- Nach der Freisetzung von Schmelze in die Reaktorgrube kann es zu einer Beton-Schmelze Wechselwirkung mit Bodenerosion kommen.
- Diese Reaktion ist zu vermeiden, was auch die Kühlbarkeit der Schmelze im Sicherheitsbehälter erfordert.

Die Vermeidung einer Schmelze-Beton-Wechselwirkung bildet eine wesentliche Voraussetzung für die Beherrschung von Unfallabläufen mit Kernschmelzen. Hierdurch wird erreicht, daß

- keine Fundamentdurchdringung als Folge einer Schmelze-Beton-Wechselwirkung auftritt,
- die Bildung brennbarer Gase ($H_2$, CO) im Sicherheitsbehälter weitgehend vermieden wird und
- keine großen Massen an $CO_2$ (Inertgas) entstehen, dies ist von Bedeutung für die Verhinderung eines erhöhten Druckes im Sicherheitsbehälter in der Langzeitphase.

**Stand des Wissens**

Während die Wechselwirkung von Schmelze mit Beton in den vergangenen Jahren umfassend experimentell untersucht wurde (z.B. an der BETA-Anlage in Karlsruhe /7/) und zur Entwicklung theoretischer Simulationsmodelle geführt hat, wurden zur Verhinderung eines derartigen Prozesses durch Kühlung von Schmelze bisher nur wenige Experimente durchgeführt.

Zur Problematik der Kühlbarkeit von Schmelze im Sicherheitsbehälter besteht daher ein hoher Forschungsbedarf.

**Technische Lösungsansätze**

Hier sollen zwei Lösungsansätze kurz erläutert werden.

- **EPR-Konzept:**
  Großflächige Schmelzeausbreitung auf thermischer Schutzschicht mit nachfolgender Wasserüberdeckung.
- **COMET-Konzept der KfK:**
  Kernfängervorrichtung (core catcher) mit Schmelze-Fragmentation und Wasserkühlung.

Im Rahmen der Entwicklung des "European Pressurized Water Reactors" (EPR) wird ein sog. Ausbreitungs-Konzept verfolgt. Nach Austritt von Schmelze aus dem Bodenbereich des Reaktordruckbehälters fällt diese auf eine schiefe Ebene, über welche die Schmelze in einen separaten Raum geführt wird, der eine Ausbreitung über eine Fläche von ca. 150 $m^2$ erlaubt.

Sowohl die schiefe Ebene als auch die Ausbreitungsfläche sind thermisch geschützt, um eine Wechselwirkung Schmelze-Beton zu verhindern. Nach dem Aufschmelzen von verschlossenen Kanälen erfolgt eine Flutung der Oberfläche mit Wasser. Die langzeitige Kühlung ist durch Wasserverdampfung, Kondensation und Kondensatrücklauf vorgesehen.

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe wird an der Entwicklung des sogenannten COMET-Konzeptes gearbeitet /8/. Der "Kernfänger" besteht aus einer in einem separaten Raum unterhalb des Reaktordruckbehälters plazierten durchbrochenen Stahlplatte, die auf einer Tragkonstruktion gelagert ist. Unterhalb der Platte befindet sich eine Wasservorlage. Auf der Platte ist eine Opferschicht vorgesehen, die beim Aufschmelzen den Ausbreitungsvorgang der Schmelze fördern soll. In diese Opferschicht sind verschlossene Stutzen eingelassen, die nach dem Aufschmelzen der Verschlußstopfen ein Eindringen von Wasser in das Schmelzebett von der Unterseite her ermöglichen sollen. Hierdurch wird eine Fragmentation der Schmelze mit einer anschließenden Wasserüberdeckung angestrebt. Durch die Verdampfung von Wasser sowie der Kondensation des entstehenden Wasserdampfes durch Kühlung der Atmosphäre des Sicherheitsbehälters und Rückführung des Kondensates in die Vorrichtung des Kernfängers soll eine langzeitige Kühlung sichergestellt werden.

### 4.5 Langzeitige Nachwärmeabfuhr aus dem Sicherheitsbehälter

**Problemstellung**

Bedingt durch die Nachzerfallsleistung des Kernmaterials wird langzeitig Wärme innerhalb des Sicherheitsbehälters freigesetzt. Die Wärmekapazität der Strukturen des Sicherheitsbehälters und seiner Einbauten ist ausreichend, die anfallende Nachwärme für mindestens einen 1 Tag nach Unfalleintritt aufzunehmen. Anschließend sind ergänzende Maßnahmen zur Wärmeabfuhr aus dem Sicherheitsbehälter zu treffen, um einen langzeitigen Druckaufbau zu verhindern.

**Stand des Wissens**

Die Nachzerfallsleistung kann Schmelze aufheizen, durch Kühlung von Schmelze mit Wasser zur Dampfbildung führen oder bei unzureichender Kühlung der Schmelze Beton oder andere Materialien aufschmelzen, wobei inerte Gase wie $H_2$, CO und $CO_2$, Dampf entstehen, die ihrerseits langfristig zum Druckaufbau im Sicherheitsbehälter beitragen bzw. brennbare Gasgemische bilden.

Der Anteil der Nachzerfallsleistung, der zur Erwärmung und Verdampfung von Wasser beiträgt und nach etwa einem Tag nach Unfalleintritt die Integrität des Sicherheitsbehälters gefährden kann, muß aus dem Sicherheitsbehälter abgeführt werden.

**Technische Lösungsansätze**

Wärmeabfuhrsysteme zur Verhinderung eines langzeitigen Druckaufbaues sollten so ausgelegt sein, daß der Druck im Sicherheitsbehälter so schnell wie möglich abgesenkt wird, um die Drucklast vom System zu nehmen und Leckagen zu begrenzen. Derartige Systeme sollten so konzipiert werden, daß sich innerhalb des Sicherheitsbehälters keine aktiven Komponenten befinden. Folgende Konzepte befinden sich z. Zt. in Diskussion:

- Kühlung des Sumpfwassers und des entstehenden Dampfes durch Kühlerund/oder Sprühsysteme (EPR-Konzept).
- Kühlung der Außenwand des Sicherheitsbehälters aus Stahl von außen durch Natur-Luftzug oder äußeren Wasserfilm (KfK-Konzept).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß erfolgversprechende Lösungsansätze vorliegen, um die Auswirkungen unfallbedingter Phänomene zu verhindern bzw. einzugrenzen.

Der Druckentlastung des Primärsystems zur Überführung eines Kernschmelzens unter hohem Systemdruck in einen sogenannten Niederdruck-Kernschmelzpfad kommt hierbei ein besonderer Stellenwert zu. Neben einer Begrenzung oder Verhinderung der aus der Verteilung von feinfragmentierten Schmelzpartikeln in der Atmosphäre des Sicherheitsbehälters resultierenden Belastungen ist diese Maßnahme, insbesondere für den gesicherten Ausschluß des Reaktordruckbehälterversagens unter hohem Systemdruck, von größter Bedeutung.

## 5. Sicherheitstechnische Bewertung von schweren Unfällen

Die Forderung nach der Berücksichtigung von schweren Unfällen in der Auslegung stellt nicht nur für die Reaktorentwicklung sondern auch für die Sicherheitsbewertung eine besondere Herausforderung dar.

Bei neuen Reaktoren ist zu bewerten, inwieweit der Sicherheitseinschluss den erhöhten Anforderungen für neue Reaktoren genügt.

Hierbei ist insbesondere zu untersuchen, inwieweit

- die erforderliche Dichtheit des Sicherheitsbehälters gewährleistet ist,
- Bypass-Pfade, d. h. eine Umgehung des Sicherheitseinschlusses, praktisch eliminiert sind,
- mögliche mechanische und thermische Belastungen vermieden, begrenzt und/oder abgetragen werden sowie
- die langfristige Nachwärmeabfuhr aus dem Sicherheitsbehälter gewährleistet ist.

Eine Sicherheitsbewertung auf deterministischer Grundlage ist hierfür besonders geeignet.

Lastannahmen für den Sicherheitsbehälter sind hierbei auf der Basis von experimentellen Ergebnissen und Analysen mit verifizierten Modellen zu bestimmen. Die hierfür erforderlichen

Daten und Methoden sind bereitzustellen. Die analytischen Werkzeuge sind zu ertüchtigen bzw. zu entwickeln und anhand experimenteller Befunde abzusichern.

Als Schwerpunkte zukünftiger F+E Arbeiten sind neben der weiteren Absicherung des Kenntnisstandes zur Dampfexplosion vor allem die Themenbereiche

- Bildung brennbarer Gasgemische einschließlich der Wirksamkeit von Gegenmaßnahmen,
- Ausbreitung und Kühlung der Kernschmelze im Sicherheitsbehälter,
- Dichtheit des Sicherheitseinschlusses,
- langfristige Nachwärmeabfuhr aus dem Sicherheitsbehälter

von vorrangiger Bedeutung.

Ziel sollte es sein, die Arbeiten im internationalen Rahmen abzustimmen. Die Zusammenarbeit, insbesondere mit Frankreich, sollte weiter vertieft werden. Hier sieht sich die GRS gemeinsam mit ihrem französischen Partner IPSN auf besondere Weise gefordert.

## 6. Zusammenfassung

- Für die nächste Generation von Kernkraftwerken wird eine neue Qualität der Reaktorsicherheit gefordert.
- Zusätzlich zu einer weiteren Verbesserung der Präventivebene ist die Rückhaltefunktion des Sicherheitseinschlusses zu verstärken. Dem Schutzziel "Erhaltung der Sicherheitsbehälter-Integrität" kommt hierbei eine herausragende Bedeutung zu.
- Die Phänomene:
  - Entstehung brennbarer Gasgemische und deren mögliche Verbrennung,
  - Aufheizung der Atmosphäre des Sicherheitsbehälters als Folge des Austreibens und einer Fragmentation von Schmelze nach Versagen des Reaktordruckbehälters,
  - Wechselwirkung Schmelze-Wasser in der Reaktorgrube (Dampfexplosion),
  - Wechselwirkung Schmelze-Beton in der Reaktorgrube (Betonerosion) und
  - Druckaufbau im Sicherheitsbehälter aufgrund der freigesetzten Nachzerfallswärme,

  sind bei der Auslegung des Sicherheitsbehälters von neuen Reaktoren zu verhindern bzw. zu berücksichtigen
- Für eine sicherheitstechnische Bewertung der Auslegung des Sicherheitsbehälters ist ein deterministischer Ansatz besonders geeignet.
- Die für die sicherheitstechnische Bewertung erforderlichen experimentellen Daten sind bereitzustellen und die benötigten analytischen Methoden zu entwickeln.

## Literatur


/1/ L. VALENCIA
Wasserstoffdeflagrationsversuche in großer 3-Raumgeometrieim HDR-ContainmentKernforschungszentrum Karlsruhe. Jahrestagung Kerntechnik Karlsruhe 5. - 7. Mai 1992

/2/ T. KANZLEITER
Versuche zur Wirksamkeit von Wasserstoff-Gegenmaßnahmenin einer Mehrraum-Containment-Geometrie. Band 1, Abschlußbericht/Final Report Nr. BleV-R67.036-01, November 1991. Band 2, Abschlußbericht / Final Report Nr. BleV-R67.036-02,November 1991

/3/ M. D. ALLEN et al.
Results of an Experiment in a Zion-Like Geometry to Investigate theEffect of Water on the Containment Basement Floor on DirectContainment Heating (DCH) in the Surtsey Test Facility: The IET-4 Test. SAND92-1241/UC-523, September 1992

/4/ M. D. ALLEN et al.
Experiments to Investigate the Effects of Fuel/Coolant Interactionson Direct Containment Heating: The IET-8A and IET-8B Experiments. SAND92-2849/UC-523, February 93

/5/ L. S. NELSON, P. M. DUDA AND D. A. HYNDMAN
Thermal- and Ignition-Type Steam Explosions of Single Dropsof Molten AluminiumTransactions of the American Nuclear Society. 64, 378-379, 1991

/6/ M. K. DENHAM, A. P. TYLER AND D. F. FLETCHER
Experiments on the Mixing of Molten Uranium Dioxide with Waterand Initial Comparison with Water and Initial Comparison withCHYMES Code CalculationsProc. 5$^{th}$ Int. Topical meeting on Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-5), Salt Lake City, 21-24 September 1992, 1667-1675 (1992)

/7/ H. ALSMEYER et al.
BETA Experiments on Zirkonium Oxidation and AerosolRelease during Melt-Concrete Interaction. 2$^{nd}$ Workshop on MCCI. Karlsruhe, 1. - 3. April 1992

/8/ H. H. HENNIES, G. KESSLER
Improved Containment and Core Catcher for future LWR's and FBR'sPaper, presented at the 6th Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems (ICENES 91). Monterey, USA; 16 - 21 June 1991

# Forschung in Deutschland - ein Diskussionsbeitrag aus der chemischen Industrie

**U.H. Felcht**

Zum Thema "Forschung in Deutschland" oder "Industriestandort Deutschland" ist in letzter Zeit viel diskutiert worden. Wenn ich heute einen weiteren Diskussionsbeitrag anbiete, tue ich das nicht mit dem Anspruch, die Standortdebatte umfassend zu führen. Ich möchte stattdessen an Hand einiger aktueller Beispiele aus Hoechst als Vertreter der chemischen Industrie belegen, wodurch unser Industrie- und damit Forschungsstandort tatsächlich in Gefahr ist - zumindest jedoch in letzer Zeit stetig unattraktiver wird, wenn man - wie es ein internationaler Konzern nun mal hat - Alternativen besitzt.

Dazu gehe ich zunächst auf die Situation der chemischen Industrie und Forschung in der Vergangenheit ein:

- Welche Faktoren meiner Ansicht nach zu der dominanten Rolle der deutschen Chemie beigetragen haben,
- welche Einflüsse uns heute herausfordern und
- wie der Chemiestandort Deutschland zukünftig aussehen wird, wenn wir gemeinsam mit allen relevanten Gruppierungen in Deutschland nicht bald Korrekturen vornehmen. Zu den relevanten Gruppierungen zähle ich nicht nur die Wissenschaft, Wirtschaft und Politik, sondern auch und vor allen die Medien als Träger und Verbreitungsorgan von für die Bevölkerung wichtigen Informationen.

Im Hauptteil werde ich die Lage anhand von aktuellen Situationen und Beispielen erläutern und die sich daraus ergebenden Konsequenzen für den Forschungsstandort Deutschland ableiten.

Die Chemie in Deutschland, sowohl die Produktion als auch die Forschung, waren einmal weltweit führend!

- Die Sprache der Wissenschaft Chemie war deutsch - die bedeutendsten Zeitschriften wie Liebigs Annalen, Chemischen Berichte, Angewandte Chemie... gehörten einst zur Pflichtlektüre jeden Chemikers.
- Bedeutende pharmazeutische Produkte, ich nenne nur einige Präparate von Hoechst wie Antipyrin, Pyramidon, das Diphtherieserum von Emil v. Behring oder Salvarsan von Paul Ehrlich, wurden in Deutschland entwickelt.
- Synthetische Farbstoffe und Pigmente kamen bis zum 1. Weltkrieg überwiegend aus Deutschland.
- Die Polymerchemie nahm von Deutschland ihren Ausgang.
- Bis 1944 kam die Hälfte der Nobelpreisträger für Chemie aus Deutschland.

Das Ausbildungssystem war gut, es gab Handwerker, Facharbeiter und technisches Personal, die Forschungsstruktur war vielseitig und von hoher Qualität, es gab eine enge Verquickung von Industrie, Universitäten und Instituten.

Die Anwendungstechnik, der Apparatebau, die Verfahrenstechnik spielten in Deutschland eine ebenfalls bedeutende Rolle, so daß die Forschungsergebnisse aus der Chemie zügig in Produkte umgesetzt werden konnten, denn im Wettbewerb kann nun einmal nur der erfolgreich sein, der wissenschaftliche Erkenntnisse schnell in Produkte und Prozesse umsetzen kann, und so im Markt wettbewerbsfähig ist.

Da in Deutschland nicht nur die Grundchemikalien hergestellt wurden, sondern auf dieser Basis auch zahlreiche Zwischenprodukte und daraus wiederum ein ganzer Baum von innovativen Endprodukten, entstand eine Verbundchemie mit sogenannten Wertschöpfungsketten. Das heißt, ausgehend von günstigen Vorprodukten, die vielen Zwecken dienten, wurden aufgrund von geringen Transportkosten, Zöllen, Handelsspannen und der Nutzung einer gemeinsamen technischen Infrastruktur auch die Zwischen- und Endprodukte konkurrenzlos günstig. Um den Absatz der Produkte am Markt mußte man sich aus heutiger Sicht nur wenig Gedanken machen.

In der Öffentlichkeit wurde die chemische Industrie als angesehener Arbeitgeber akzeptiert. Eine übertriebene Umweltsensibilität, wie wir es heute haben, oder gar eine Technikfeindlichkeit gab es nicht. Jedoch, die heute sicherlich nicht mehr zeitgemäße gesellschaftliche Überbewertung der Naturwissenschaftler gehört zu Recht ebenfalls der Vergangenheit an.

So war insgesamt in Deutschland ein Chemie-freundliches Umfeld entstanden, das die schlechte Rohstoffsituation mehr als wett machte. Ja, sogar die verheerenden Niederlagen der beiden Weltkriege mit der Zerstörung der hiesigen Industrieanlagen und der Enteignung der ausländischen Tochtergesellschaften konnten letzten Endes verkraftet werden. Manchem mag das als ein Wunder erscheinen, dahinter steckte aber die Stärke, die von diesem skizzierten Umfeld ausging.

Die heutige Situation stellt sich leider anders dar. Unsere einstmals führende Ausbildungs- und Forschungsstruktur hat gerade im Vergleich zu USA und Japan an Bedeutung verloren. Ich erinnere an die langen Studienzeiten und an die im Vergleich, zum Beispiel zu USA und anderen EG-Ländern, relativ geringe Förderung unserer universitären Forschung. Aufgrund der hohen Lohn-, Sozial- und Investitionskosten, die direkt auf die chemische Industrie einwirken, sind natürlich auch die heimische Anwendungs- und Verfahrenstechnik sowie der Apparatebau betroffen, die ebenfalls an Bedeutung verlieren.

Mit einer Inflationsrate von 4,5 % kann die Währungsstabilität im internationalen Vergleich für Deutschland noch als Pluspunkt gewertet werden. Bei dem Schuldenberg, den sich unser Staat jedoch leistet, ist Deutschland aber nicht als finanziell gesundes "Unternehmen" zu bezeichnen. Die hohe Unternehmensbesteuerung und die Abgabenlast speziell der Umweltabgaben, machen es in Deutschland immer schwerer, Gewinne zu erzielen, die wir zur Zukunftssicherung in unsere Forschung stecken könnten. Dazu kommt auf Grund der EG eine staatliche Überreglementierung von inzwischen 4 Ebenen (Europa, Deutschland, Länder,

Kommunen). Das macht heute die Einführung eines neuen chemischen Produktes nicht nur sehr kompliziert, das kostet auch den Staat und die Betriebe Unsummen an Geld und Zeit und vielleicht das Schlimmste, es zwingt unsere Forscher, Bürokraten zu werden. Unsere Wettbewerbssituation wird dadurch auf Dauer verheerend geschwächt. Wenn wir diesen Standortnachteilen nicht entschlossen entgegenwirken, wird die deutsche chemische Industrie und damit auch die Forschung ihre noch verbliebene Bedeutung einbüßen.

Da das Know-how im Ausland besser umgesetzt werden kann, wird es aus Deutschland inklusive der Wissenschaftler abfließen. Bei den Gentechnikern haben wir diese Situation ja teilweise schon. Die Wertschöpfungsketten werden zu "Verlustketten" und damit aufgegeben bzw. ins Ausland transferiert. Selbstverständlich hat es dann auch keinen Sinn mehr, nur noch die Endprodukte in Deutschland zu fertigen. Da andere Branchen ähnliche Schwierigkeiten haben, werden wir zusätzlich einen zunehmenden Teil unserer Kunden in Deutschland verlieren (z.B. die Textilindustrie als Großkunde von Farbstoffen).

Andere Wirtschaftszweige in Deutschland könnten auch nicht mehr von den Innovationen der deutschen Chemie profitieren, da die Chemie eine typische Querschnitts- technologie ist. Ich denke zum Beispiel an das kunststoffverarbeitende Gewerbe (Polymere) oder an die Automobilindustrie (z.B. Lacke), ja selbst die Elektronikindustrie.

Insgesamt gesehen, wirkt eine desolate Lage der chemischen Industrie und Forschung mannigfaltig auf das "System" Deutschland zurück. Die Attraktivität des Forschungsstandorts wird genauso leiden wie die Steuereinnahmen, die auf die hohen Beiträge der chemischen Industrie verzichten müssen; ganz abgesehen von den verlorenen Arbeitsplätzen und den Aufwendungen für unser Sozialsystem.

Auch die Forschung wird sich dorthin verlagern, wo es die günstigsten Rahmenbedingungen gibt bzw. dorthin, wo sie gebraucht wird und wo Spitzentechnologie verfügbar ist, zu Produktion und Kunden. Die Forschung in der chemischen Industrie ist eingebettet in die Lieferant-Kunden-Beziehung. Da viele Kunden in Nordamerika und Japan sitzen, haben wir in diesen hochentwickelten Regionen Verkauf, Produktion und Forschung schon aufgebaut. Aber auch in anderen Teilen Asiens und Südamerikas haben wir Kunden. Wir wollen zukünftig verstärkt dort die teilweise erheblichen Standortvorteile für die Produktion nutzen.

Mittelfristig muß dann auch die Forschung zu Entwicklung, Produktion, Verkauf und Kunde verlagert werden. Problemlösungen werden nun einmal effektiver vor Ort mit dem Kunden oder an der Produktionsanlage bearbeitet.

Insofern wirken sich Standortnachteile bei der Produktion und Kundenverlagerungen auf die Forschung in Deutschland aus. Produktion und Forschung in der Industrie sind eng verknüpft und werden in den folgenden Ausführungen gemeinsam betrachtet.

- ❑ Zu den spezifischen Standortnachteilen der Produktion, wie
- ❑ die überhöhten Umweltauflagen,
- ❑ die weltweit höchsten Lohnkosten,
- ❑ die Verlagerung der Wertschöpfungsketten ins Ausland,

- die allzu langen Genehmigungszeiten und
- die Abwanderung von Kunden

kommen noch in Deutschland erschwerend die hohen Steuern sowie spezielle, als Regulation gedachte Umweltabgaben hinzu. Aufgrund der sich rasch ändernden, exponentiell wachsenden Gesetzgebung in Deutschland sind auch die "gelobten" Rahmenbedingungen gar nicht so stabil: Nur mit erheblicher Unsicherheit lassen sich Investitionskosten in die Zukunft projizieren. Vor allem eine "konkurrenzlose" staatliche Überreglementierung, die eine aufwendige Bürokratie erfordert und zu extrem langen Genehmigungszeiten führt, macht uns bei der Produktion und auch immer mehr bei Forschungsvorhaben zu schaffen.

Im Folgenden möchte ich diese Argumente an Hand von aktuellen Beispielen aus Hoechst belegen. Zunächst einige Beispiele, die zeigen, wie überhohe Umweltauflagen und Lohnkosten die entsprechende Chemie aus Deutschland bereits verdrängt haben. Als erstes zu einem Produkt, das in Hoechst eine lange Tradition hat, dem b-Naphtol.

Die Synthese - ausgehend von Naphthalin - ist seit 1869 bekannt. 1882 wurde die Fabrikation bei Hoechst als Vorreiter aufgenommen. b-Naphthol ist ein wichtiges Zwischenprodukt für Farben, Pigmente und Pharmaka. Es wurden in Hoechst bis zuletzt ca. 12.000 t/a hergestellt, das entspricht etwa einem Sechstel des Weltbedarfs. Obwohl es sich bei diesem Produkt, in Neudeutsch, um eine Commodity handelt, wurde die Produktion permanent, zeitweise durch eine recht intensive Forschung begleitet. So wandelte sich das Produktionsverfahren von einem körperlich anstrengenden Prozeß in Bleibottichen zu einem modernen, kontinuierlich betriebenen Verfahren in Edelstahlkolonnen.

Noch 1985 wurden 55 Mio DM wegen neuer Umweltauflagen investiert, um das bei dem Verfahren entstehende Natriumsulfat aus dem Abwasser zu entfernen. Dieses Natriumsulfat, das konkurrenzlos günstig auch aus natürlichen Ressourcen gewonnen wird, gelangt trotz dieser Investition doch wieder quantitativ in die Abwässer. Es wird nämlich in Waschmitteln eingesetzt und durch die privaten Haushalte letzten Endes doch ins Abwasser gegeben. Die Kosten-Nutzen-Relation liegt hier im Argen, aber das zählte anscheinend nicht.

Im Gegenteil, 1992 hätten aufgrund weiterer Umweltauflagen zusätzliche 40 Mio. DM investiert werden müssen. Schon ohne diese zusätzlichen Kosten war die Herstellung kaum noch konkurrenzfähig, zum Beispiel gegenüber einer Produktion in China.

Wie gut unser Verfahren durch unsere Forschung optimiert war, zeigt sich in mehr als 10 % geringeren Materialkosten in Deutschland. Dies nützt uns jedoch nichts, da die Materialkosten bei den Gesamtkosten nicht dominierend sind. Lohn- und Umweltschutzkosten, die sich auch hinter erhöhten Reparatur-, Energie- und sonstigen Kosten verbergen, führen zu fast doppelt so hohen Herstellkosten in Deutschland. Bevor Ihnen ein noch drastischeres Beispiel zu den Kosten, die durch Umweltauflagen verursacht werden, gezeigt wird, möchte ich auf die hohen Lohnkosten in Deutschland verweisen.

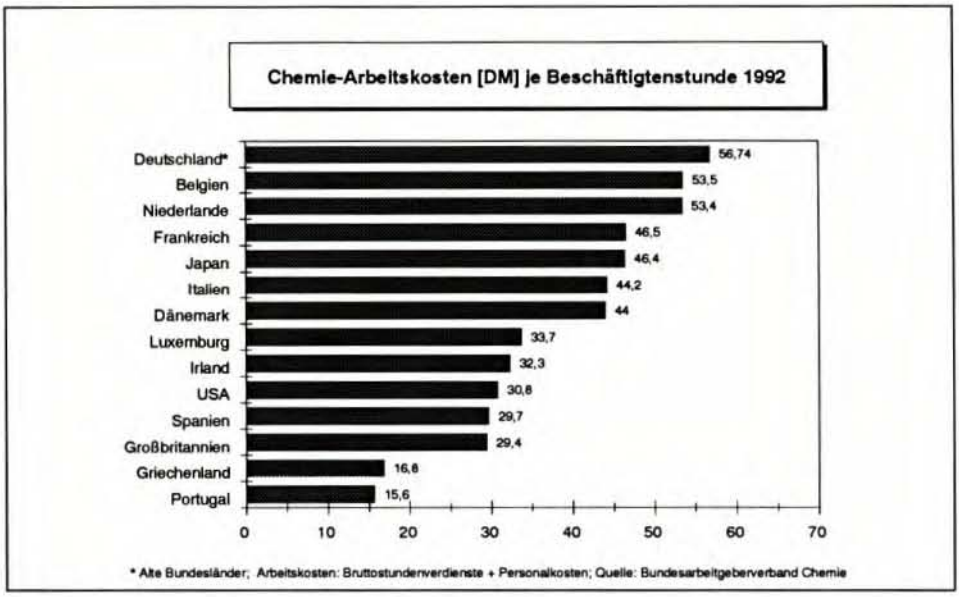



Bild 1: Chemie-Arbeitskosten je Beschäftigtenstunde 1992

Wir sind nach wie vor "Spitzenreiter" bei den Lohnkosten, vor Japan und Frankreich und weit vor den USA und Großbritannien. Dabei ist unsere Wertschöpfung pro Chemie-Beschäftigten und damit letzlich auch unsere Produktivität inzwischen deutlich geringer als in den USA.

Das 2. Beispiel, wie überhöhte Umweltauflagen und Lohnkosten einen weiteren Prozeß aus Deutschland verdrängt haben, ist die CLT-Säure. Sie ist ebenfalls ein Zwischenprodukt für Farben und Pigmente. Da die CLT-Säure schon auf mehreren Vorstufen aufbaut, sind die Kosten für die Edukte in Deutschland schon deutlich höher als zum Beispiel in Korea. Die Umweltschutz-Kosten stecken nicht nur in direkten zusätzlichen Investitionen bzw. den Kapitalkosten, sondern auch im Ausgangsmaterial, den Reparaturen der komplexeren Anlagen in Deutschland und den Energiekosten. Zusammen machen die Kosten für den Umweltschutz in diesem Fall ca. 50 % unserer Herstellkosten aus. Trotz technologischer Vorteile waren wir nicht mehr konkurrenzfähig.

Welche Konsequenzen ergeben sich nun aus diesen beiden Beispielen?

Die CLT-Säure-Produktion sowie die Produktion von β-Naphthol wurde ebenso wie die begleitende Forschung eingestellt, die Produkte aufgegeben. Das wirkt sich nicht nur ungünstig auf den Standort Deutschland wegen der wegfallenden Arbeitsplätze, Steuern, Sozialbeiträge aus, sondern führt auch zu einer Verteuerung unseres Standortes Hoechst durch den Wegfall von Deckungsbeiträgen. Deckungsbeiträge, die die Produkte zu den Allgemeinkosten beisteuern müssen, z.B. für die Bezahlung von Wachleuten oder Verwaltung, zentralen Einrichtungen, werden jetzt auf weniger Produkte umverteilt oder gekürzt. Dadurch steht auch

der Forschung, speziell unserer ressortübergreifenden Forschung, weniger Geld zur Verfügung.

Eine weitere Konsequenz ist, daß wir jetzt unseren Bedarf an β-Naphthol und CLT-Säure durch Zukauf aus Niedriglohnländern decken, zu Preisen, die im Falle der CLT-Säure unter unseren Umweltschutzkosten liegen.

Wir haben an einem aktuellen Beispiel kalkuliert, ob wir mit deutschen Umweltstandards trotzdem einen Kostenvorteil hätten, wenn wir im Ausland investieren. Vorgabe für die Kalkulation war, exakt die gleiche Anlage mit der gleichen Ausstattung in dem jeweiligen Land zu berücksichtigen. Die Investitionssummen für den untersuchten Betrieb betragen in den USA 94 Mio DM, in Mexiko immerhin 72 Mio DM, in Indien wegen der geringen Lohnkosten nur 14 Mio DM und in Deutschland nur deswegen 53 Mio DM, weil ein Großteil der Infrastruktur für den geplanten Betrieb schon vorhanden war. Ohne Berücksichtigung dieses Vorteils wären die Investitionskosten hier ebenso hoch wie in den USA.

Wie sich durch die hohen Umweltauflagen, Lohnkosten und der Abwanderung von Kunden ganze Wertschöpfungsketten ins Ausland verlagern, zeigt das nächste Beispiel:

Das bereits diskutierte β-Naphthol ist ein wichtiges Zwischenprodukt für Pigmente, die über "β-Oxynaphthoesäure" und Naphthol AS zugänglich sind. Wie sich nun, ausgehend von dem in Deutschland zu teuren β-Naphthol, die ganze darauf aufbauende Wertschöpfungskette in quasi eine "Wertvernichtungskette" verkehrt, zeigt Bild 2.

Bei β-Naphthol betrug die Preisdifferenz zum Weltmarkt etwa 2,40 DM. Wir haben, wie bereits schon erwähnt, die Produktion eingestellt. β-Naphthol können wir jetzt aus Polen, der Tschechei, Indien oder China beziehen. Dadurch wird zwar der Abstand zum Weltmarktpreis des Folgeproduktes "BONS" geringer. Aber um konkurrenzfähig zu werden, reicht das noch nicht aus! Wir versuchen zur Zeit mit einem erheblichen Forschungs- und Entwicklungseinsatz dieses Produkt zu retten und die Produktion in Deutschland wieder rentabel zu machen. Das muß allerdings mit großer Skepsis gesehen werden, da die Konkurrenten aus Fernost konsequent ihre neu aufgebaute Wertschöpfungskette nutzen, d.h. wegen Wegfall von Handelsspannen, Zöllen, Transportkosten schon bei den Materialpreisen eine deutlich günstigere Ausgangsposition aufgebaut haben.

Nach und nach, das heißt Stufe um Stufe, werden wir dadurch - lassen Sie es mich hart formulieren - "aus dem Markt gejagt". Das macht auch bei der nächsten Stufe, dem Naphthol AS nicht halt. Das als Beispiel gewählte aromatische Amin, das mit Naphthol als Kupplungskomponente ins Pigment überführt wird, ist ebenfalls am Weltmarkt günstiger als aus heimischer Produktion zu haben. Gegenwärtig können wir das Endprodukt, das sogenannte Pigment Rot 2, nur deswegen noch zu einem hohen Preis verkaufen, weil wir wegen der Reaktionsführung in der letzten Stufe noch Qualitätsvorteile bieten können. Es ist aber nur noch eine Frage der Zeit, wann wir auch mit dem Endprodukt ins Hintertreffen geraten.

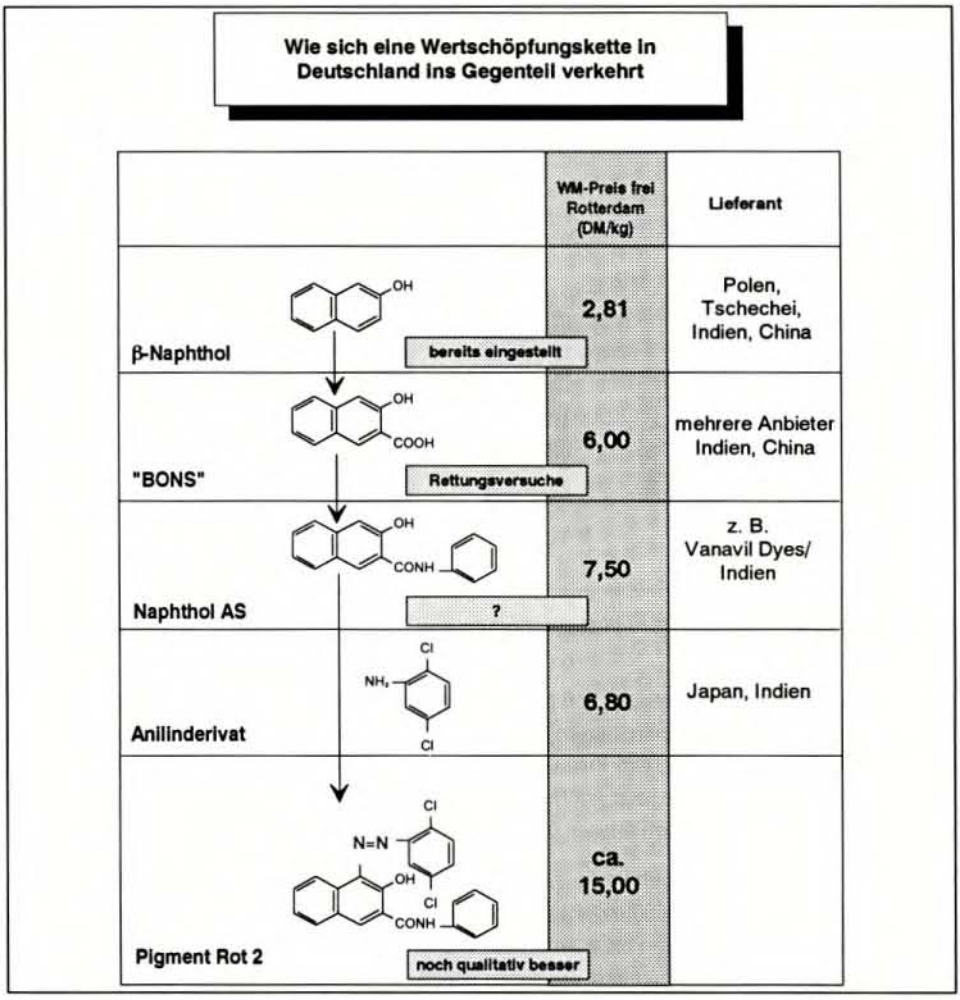



Bild 2: Verkehrung der Wertschöpfungskette ins Gegenteil

Eine andere Kostenbetrachtung ergibt sich am Beispiel dreier weiterer Pigmente, die gemeinsam in einem Betrieb produziert werden und deswegen die gleiche Kostenstruktur aufweisen. Auch diese Endprodukte sind nicht mehr konkurrenzfähig, weil Material-, Fertigungs- und Overheadkosten in Deutschland etwa doppelt so hoch liegen wie in China.

Soviel zu den Pigmenten basierend auf β-Naphthol.

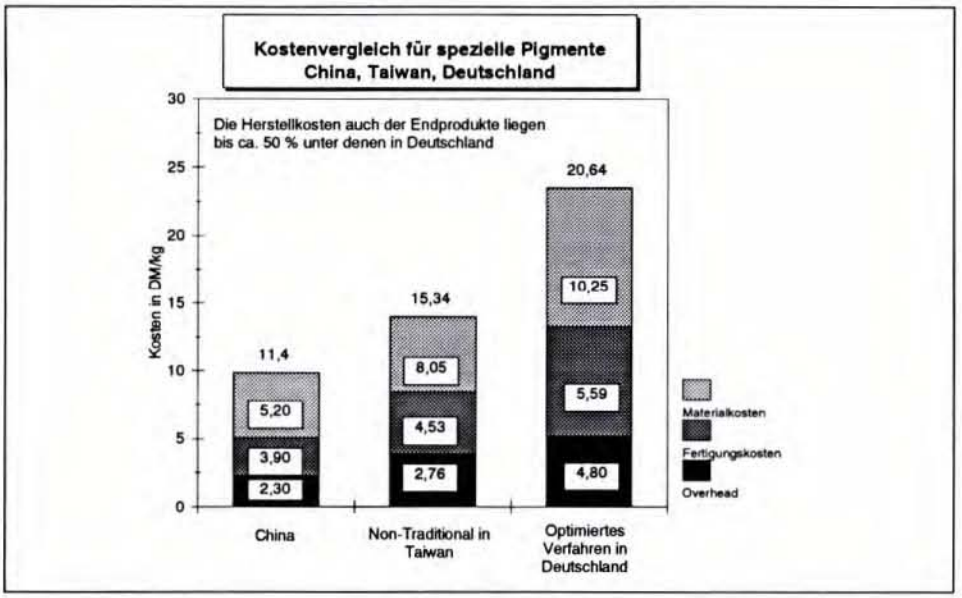



Bild 3: Kostenvergleich für spezielle Pigmente

Bei den Textilfarbstoffen auf Basis von β-Naphthol, die ebenfalls in einer Wertschöpfungskette ausgehend von Naphthalin liegen, kommt erschwerend hinzu, daß die Kunden, die Textilindustrie, schon vor Jahren ihren Schwerpunkt nach Fernost verlagert haben. Unsere Konkurrenten in Fernost, die jetzt auch die Textilindustrie lokal beliefern können, haben eine stürmische Entwicklung in den letzten Jahren durchgemacht.

Waren sie 1980 noch praktisch bedeutungslos mit einem Weltmarktanteil von 3 %, so haben sie in einer explosiven Entwicklung 1990 schon 11% und heute 15% Weltmarktanteil errungen. Deutsche Firmen deckten bis zum ersten Weltkrieg praktisch noch den gesamten Markt ab und konnten nach dem zweiten Weltkrieg wieder 25% Weltmarktanteil erringen. Wurde aber in der Mitte der sechziger Jahre dieser Anteil noch ausschließlich in Deutschland produziert, so hat sich heute die Hälfte unserer Produktion zu Tochtergesellschaften im Ausland verlagert.

Die Situation für die Textilfarbstoffe in Deutschland stellt sich damit wie folgt dar:

Die Kunden sitzen in Fernost, die Konkurrenz beliefert schon lokal, die Produktion in Deutschland wird teurer, während zum Beispiel in Indien ein konkurrenzfähiger kostengünstiger Apparatebau existiert. Geringe Löhne und wenige behördliche Auflagen führen sowohl zu einem günstigen Anlagenbau als auch zu einem kostengünstigen Produktionsbetrieb. Bei Errichtung einer eigenen Produktion von Vorstufen könnte wieder eine Wertschöpfungskette aufgebaut werden.

Wie sieht nun die Konsequenz aus dieser Situation aus?

Wir müssen die Produktion aufgeben oder in Niedriglohnländer verlagern. Auf jeden Fall können wir auf Dauer die Farbstoffproduktion in Deutschland nicht aufrecht erhalten. Bereits die Einstellung von β-Naphthol wirkte sich nicht nur negativ wegen der fehlenden Deckungsbeiträge aus. Auch das Edukt Schwefelsäure wurde von heute auf morgen nur noch in wesentlich geringerer Menge im Stammwerk benötigt. Durch

die geringe Auslastung der "Schwefelsäure" wurde auch diese Produktion unrentabel. Produzieren wir erst einmal die Farbstoffkupplungskomponenten in Niedriglohnlän- dern so werden auch die aromatischen Amine aus Deutschland für die Kupplungsreaktion zu teuer. Die Mengenreduzierung löst dann in Deutschland wieder den gleichen Teufelskreis aus:

- Mengenreduzierung,
- mangelnde Kapazitätsauslastung,
- folgende Unwirtschaftlichkeit,
- Schließung der Anlage,
- Wegfall der Deckungsbeiträge,
- Rückkopplung auf Edukte und Produkte, auch auf die Forschung,
- der Teufelskreis beginnt von neuem.

Wir stehen bei der nächsten Stufe wieder vor der Frage, den Aromaten zu kaufen oder auch im Niedriglohnland zu fabrizieren. Nach und nach verlagert sich also die gesamte Wertschöpfungskette. Da dann Kunde, Vertrieb und gesamte Produktion im Niedriglohnland zu finden sind, fehlt der entsprechenden Forschung in Deutschland die Grundlage. Durch "Kundenferne" können die Probleme nicht gelöst werden. Als Folge davon wird die Forschung ebenfalls in die Niedriglohnländer verlegt, zumal zum Beispiel in Indien gut ausgebildete Naturwissenschaftler vorhanden sind.

Ich möchte an dieser Stelle eine Zwischenbilanz ziehen:

Meiner Ansicht nach gibt es eine Fehlentwicklung der globalen Wettbewerbsstruktur. Die 3. Welt übernimmt nicht nur die Produktion von Commodities, sondern rollt nach und nach mit ungebremster Dynamik die Wertschöpfungsketten bis hin zu den Endprodukten auf; und zwar auf Kosten von Mensch und Natur, während unsere hochmodernen Anlagen in Deutschland mit dem Ökodumping nicht mithalten können.

In Deutschland kommt erschwerend hinzu, daß unser technischer Vorsprung vor den Niedriglohnländern immer mehr verloren geht. Die Umsetzung unserer Innovationen wird durch die Bürokratie von außen und die dadurch **erzwungene** Bürokratie innerhalb des Unternehmens immer langsamer und die Gewinnmöglichkeiten sinken. Eine direkte Ursache sind die hohen Steuern und Umweltabgaben. Die sich permanent ändernden Gesetzesgrundlagen führen in dieser Hinsicht zu unstetigen Rahmenbedingungen. Dazu das nächste Beispiel:

In Hoechst wurde Jahr für Jahr mehr in den Umweltschutz investiert, außer erstmals 1992. Mittlerweile geben wir jährlich über 1 Mrd. DM für den Umweltschutz aus. Das führte zum Beispiel beim Abwasser zu einer beträchtlichen Reduktion der Schadstoffe. So wurde die

organische Belastung der Hoechst Werke im Rhein-Main-Gebiet, gemessen an Hand des CSB und $BSB_5$-Wertes (des chemischen und biologischen Sauerstoffbedarfes), von 150t/Tag im Jahre 1978 auf etwas über 20 t/Tag gesenkt. Trotz dieser enormen Anstrengungen wird das Unternehmen durch zunehmende Abwasserabgaben "bestraft". Diese haben damit keine "Incentive Wirkung" mehr, sondern dienen als eine zusätzliche Einnahmequelle für den Staat, um nicht "Steuern" zu sagen.

Hatte das Abwasserabgabengesetz zunächst noch eine "Lenkungsfunktion" zumindest bis 1985, so kann man nach der dritten Novelle, die ab 1991 griff, nur noch von einer heimlichen oder besser "unheimlichen" Steuer sprechen. Wie die erneute Novellierung, die uns evtl. Mitte 1994 erwartet, aussehen wird, ist noch ungewiß. Führt sie wirklich zu einer Senkung der Abgaben? Ab wann? In welcher Höhe? Das sind Unsicherheiten und im Zweifelsfall muß die ungünstigste Variante angenommen werden.

Unstetige gesetzliche Rahmenbedingungen ergeben sich auch durch die fast unüberschaubare Anzahl neuer Gesetze und Auflagen, die kaum im voraus kalkulierbar sind. Ich komme darauf später zurück. Um Mißverständnissen vorzubeugen, ich sehe hier sehr wohl die politische Stabilität gegenüber anderen Ländern, die relativ gute Geldwertstabilität, den sozialen Frieden, die Verkehrsinfrastruktur. Es muß nur darauf aufmerksam gemacht werden, daß Kosten- und Gewinnkalkulationen immer mehr auf "wenn und aber" basieren, die eine unternehmerische Entscheidung für eine Investition in Deutschland schwer machen.

Erinnern möchte ich auch noch daran, daß die Steuern, die Grenzsteuersätze von Kapitalgesellschaften auch nach dem Standortsicherungsgesetz in Deutschland an der Spitze stehen. In Großbritannien zum Beispiel sind die entsprechenden Belastungen der Industrie nur halb so hoch. Soviel zu Steuern und Abgaben.

Zum letzten Themenblock, der Überreglementierung und den damit verbundenen langen Genehmigungszeiten sowie der aufwendigen Bürokratie die folgenden Beispiele:Das erste handelt von einer anderen Art von "Blutsaugern", nämlich Blutegeln, die einen gerinnungshemmenden Wirkstoff, das Hirudin, produzieren, um das Blut des "Opfers" flüssig zu halten. Beim Hirudin handelt es sich um ein Peptid bestehend aus 65 Aminosäuren, das spezifisch Thrombin inhibieren kann. Es soll eingesetzt werden zum Beispiel bei Angina pectoris, zur Behandlung von Thrombosen und nach Bypass-Operationen. Nun müßte man für eine Dosis Hirudin mehrere tausend Blutegel opfern. Seitdem es aber möglich ist, Hirudin gentechnisch herzustellen, kann man prinzipiell genügend Substanz für umfassende pharmakologische Untersuchungen zur Verfügung stellen.

Dazu synthetisierte man das entsprechende Gen, das zuvor strukturell aufgeklärt wurde, und pflanzte es in einen sogenannten Hefe-Expressionsvektor, der in Hefezellen wieder eingeschleust wurde. Diese rekombinanten Hefezellen können nun in einer Fermentationsanlage das gewünschte Hirudin produzieren. Nach einer Aufreinigung erhält man das saubere Präparat. Und hier fing unser Problem an. Wir wollten Prüfware herstellen und Verfahrensoptimierungen in unserem Biotechnikum durchführen, also die Fermentation und die Aufreinigung.

Im Juni 91wurde eine gentechnische Anlage zu Forschungszwecken der Sicherheitsstufe 1 nach GenTG (Gentechnikgesetzt) angemeldet. Sicherheitsstufe 1 heißt, daß die Behörden zuvor den Umgang mit diesen rekombinanten Hefezellen, als für Mensch und Umwelt "mit keinem erkennbaren Risiko verbunden", eingestuft haben. Im Juli wurde die Anmeldefrist durch den Regierungspräsidenten unterbrochen und Informationen nachgefordert. Im Oktober 91 wurde erklärt, eine Genehmigung nach BImSchG (Bundesimissionsschutzgesetz) wäre erforderlich. Ein solches Genehmigungsverfahren alleine dauert in der Regel 1-1,5 Jahre. Davon wurde nach Gesprächen im Dezember 91 Abstand genommen. Jedoch sei das einfache Anmeldeverfahren nicht ausreichend. Für den vorgesehenen Versuch müßte ein Genehmigungsverfahren nach GenTG durchgeführt werden, da der Maßstab von 10 l überschritten wurde. Zur Darstellung von 500 g Hirudin brauchen wir 20 cbm Fermentationsbühe! Anfang 1992 wurden bereits die Genehmigungsunterlagen eingereicht.

Nach dem langwierigen Genehmigungsprozedere mit unserer Humaninsulinanlage und den sich hier abzeichnenden Schwierigkeiten schon bei einem Forschungsprojekt wurde im Februar 92 der Beschluß gefaßt, die Produktionsanlage für Hirudin im Ausland einzurichten.

Die Genehmigung zur Produktion von Hirudin wurde in Frankreich innerhalb von 2 Monaten erteilt. In Deutschland hingegen wurden weitere Nachforderungen zum Genehmigungsantrag des Forschungsvorhabens verlangt. Nach 2 Jahren erhielten wir die Genehmigung zu der als risikolos eingestuften Forschung. Jedoch wurden durch das Genehmigungsverfahren die Freiräume für die Verfahrensoptimierung so stark eingeengt, daß praktisch keine Prozeßparameter mehr geändert werden können. - Eine Forschung ist unter diesen Bedingungen wohl kaum möglich! Wie sieht es mit ähnlichen Genehmigungen in anderen Ländern aus?

Hoechst hat hier folgende Erfahrungen gemacht:

- ❑ Die Produktionsanlage für einen Tierimpfstoff in Großbritannien wurde in 2 Wochen genehmigt.
- ❑ Der Antrag für die Hirudinproduktion (zuvor Interferon) wurde in Frankreich innerhalb von 2 Monaten erteilt.
- ❑ Die Betriebsgenehmigungen für Forschungslabors in USA und Japan wurden mit dem Abschluß der Bauarbeiten erteilt; für die Baugenehmigungen wurden 2-3 Wochen benötigt.
- ❑ Bei der Genehmigung von 150 Freilandversuchen mit genetisch veränderten Pflanzen in Kanada, Frankreich un den Niederlanden gab es keine Probleme!

Den Technologierückstand auf dem Gebiet der Gentechnik können wir mit den EG-Richtlinien nicht aufholen. Wir brauchen eine Anpassung an die Richtlinien der USA und Japan sowie eine entsprechende Handhabung dieser Richtlinien. In Frankreich, Großbritannien und vor allem in Dänemark wird viel pragmatischer vorgegangen: man hält sich nur eingeschränkt an EG-Richtlinien. Ist in unseren europäischen Nachbarländern meist nur eine Behörde für die Genehmigung zuständig, so sind in Deutschland alleine beim oben gezeigten Beispiel des Forschungsvorhabens Hirudin sechs Behörden direkt am Verfahren beteiligt. Unter anderem die Feuerwehr und die Wasserbehörde.

Zum letzten Beispiel: es handelt sich um eine Verfahrensverbesserung mit erheblichen ökologischen Vorteilen, bei der wir vom Beschluß der Realisierung des neuen Verfahrens bis zum ersten Lauf Jahre gebraucht haben. Bei dem neuen Verfahren handelt es sich um eine katalytische Hydrierung von Nitro-aromaten zu aromatischen Aminen für Pigmente, wie sie zuvor in meinem Bericht schon genannt wurden, aber auch für Pharmaka und Pflanzenschutzmittel. Das Verfahren sollte von der Reduktion mit Eisen auf Wasserstoff umgestellt werden.

Als Reaktionsprodukt fällt dann Wasser statt Eisenoxid an. Die Anforderungen an den neuen Prozeß waren recht hoch:

- die neue Reaktionsstufe mußte in einem Chargenbetrieb mit einem breiten Produktspektrum integriert werden,
- der Katalysator mußte problemlos abgetrennt werden können,
- durch Katalysatormodifikation wurde es geschafft, die Nebenproduktbildung zurückzudrängen,
- ein hoher Automatisierungsgrad und die Steuerung über ein Prozeßleitsystem mußte gewährleistet werden.

Die jetzt laufende Anlage hat einen hohen Sicherheitsstandard und liefert eine stabile Produktqualität.

Wir konnten den Betrieb von 20 auf 2 Produktionsstraßen wegen der jetzt kurzen Typwechselzeiten reduzieren. Neben diesem Rationalisierungseffekt weist das Verfahren auch eine enorme Verminderung des Reststoffanteiles auf. Pro 100 kg hergestelltem aromatischen Amin fällt im Vergleich zum alten Verfahren praktisch kein Abgas und keine CSB-Belastung der Abwässer mehr an. Statt 237 kg verbleiben jetzt nur noch 1,5 kg fester Rückstand. Trotz dieser ökonomischen und ökologischen Vorteile brauchten wir für die Realisierung 6 Jahre. Die Behördenvorgespräche begannen 1985 direkt nach dem Investitionsbeschluß. Die umfangreichen Genehmigungsunterlagen konnten im April 1986 eingereicht werden. Der Genehmigungsbescheid kam Ende September 1987. Allerdings machten Auflagen das Verfahren um 30% teurer und Einwände von seiten der Öffentlichkeit setzten praktisch den Genehmigungsbescheid außer Kraft. Die Einwender nahmen übrigens die Umweltnachteile, die durch den alten Prozeß zwischenzeitlich entstanden, billigend in Kauf, nach dem Motto "Was von der Industrie Neues kommt, kann nicht gut sein". Hier brachten uns zusätzlich die verbreitete Technikfeindlichkeit und die Beteiligung der Öffentlichkeit am Verfahren in Zeitverzug. Nach dem Widerspruchsbescheid 1988 konnte dann endlich der Bau begonnen und nach zweieinhalb Jahren fertiggestellt werden. Ein halbes Jahr später konnte die Produktion aufgenommen werden. Bei diesem offensichtlich gerade für die Umwelt vorteilhaften, einfachen Prozeß brauchten wir für die Genehmigung letzlich 3 Jahre.

Die Schuld an den langen Genehmigungszeiten den Behörden in die Schuhe zu schieben, ist zu einfach. Durch die Komplexität der Gesetzgebung für die Genehmigung und den Betrieb von Chemieanlagen (auch Pilotanlagen zählen hierzu) sind auch die Behörden überfordert.

Bild 4: Gesetzgebung auf dem Umweltgebiet (Auszug gültig für Rheinland-Pfalz)

Bild 4 zeigt allein die Zunahme der Gesetzgebung auf dem Gebiet der Umweltschutzgesetzgebung auf mittlerweile weit über 100 Regulierungen. Für die Genehmigung und den Betrieb von Chemieanlagen sind heute ca. 2000 Gesetze, Verordnungen, Erlasse, technische Anleitungen und Verordnungen bindend. Entsprechend wächst auch der Umfang an Unterlagen.

Hier sehen Sie die Zunahme der Unterlagen nur für den Antrag gemäß dem Bundes-immissionsschutzgesetz - also nur eines Gesetzes für ein Produkt. Innerhalb von 11 Jahren hat sich der Papierberg für den gleichen Vorgang vervierzehnfacht. Das Ergebnis dieser Papierschwemme ist bestimmt nicht mehr Sicherheit oder weniger Emissionen!

Meine Damen und Herren, ich habe an einigen Beispielen gezeigt, wie

- ❑ die hohen Umweltauflagen
- ❑ die hohen Lohnkosten
- ❑ die Verlagerung der Wertschöpfungsketten
- ❑ die Abwanderung von Kunden
- ❑ der unstetige gesetzliche Rahmen
- ❑ die Überreglementierung verbunden mit langen Genehmigungszeiten und
- ❑ eine aufwendige Bürokratie

beginnen, die Chemie, Produktion und Forschung aus Deutschland zu verdrängen.

Es gibt allerdings auch Gründe, eine Forschung außerhalb Deutschlands aufzubauen, die mit diesen Faktoren nichts zu tun haben. In anderen Ländern haben sich Schlüsseltechnologien entwickelt, bei denen Deutschland keine führende Position hat oder nicht mehr aufweist.

Wir in Hoechst wollen dabei nicht den Anschluß verlieren - auch um unserer internationalen Konkurrenzfähigkeit gerecht zu werden. Eine internationale, triregionale Arbeitsteilung können sich selbstverständlich nur größere Konzerne leisten und weiterverfolgen. Wenn wir in Zukunftsmärkte investieren und unsere Produkte weiterentwickeln wollen, müssen wir da forschen, wo eine Technik am weitesten entwickelt ist, wo entsprechende Fachleute, Institute, Universitäten und das Know-how sind. Auf den Gebieten der Optoelektronik und der Hochleistungsmaterialien haben wir unsere Schwerpunkte bereits in die USA verlagert. Biotechnologie- und Elektronik-Schwerpunkte haben wir in Japan gesetzt.

Inzwischen stecken wir jährlich mehr und mehr von unseren mittlerweile knapp 3 Mrd. DM Forschungsaufwendungen in unsere Auslandsforschung. Waren es 1970 noch 5%, so sind es heute bereits **über** 40%. Der Betrag für Deutschland ist währenddessen in etwa konstant; in Anbetracht der Lohn- und Preisentwicklung aber sinkt er real bereits!

Warum, meine Damen und Herren halte ich vor Physikern und Ingenieuren, bei Ihnen, denn diesen Vortrag?

Die Chemie ist eine Schlüsseltechnologie für die meisten auch Ihrer Forschungsgebiete. Wenn die Chemie inclusive Produktion gerade in diesen Schlüsselbereichen aus Deutschland verschwindet, meine Damen und Herren, ich glaube dann würde sich das auch in vielen Fällen auf andere "High Tech"-Arbeitsfelder auswirken.

Deshalb sind wir alle gefordert, Deutschland für die Forschung und Produktion wieder attraktiver zu machen! Lassen sie mich dazu drei Schwerpunkte nennen:

- Wir müssen **schneller** werden: hier ist vor allem die Politik gefragt, den gesetzlichen Rahmen wirklich stark zu vereinfachen und die Auflagen unter den Kosten-Nutzen-Aspekt zu stellen.
- Wir müssen **flexibler** werden: das trifft auch vor allem die Behörden, die eine weniger steife, weniger "gründlich deutsche" Handhabung der Gesetze praktizieren, sondern stärker problemorientiert vorgehen sollten.
- Wir brauchen eine **zeitgemäße Menschenführung,** die vielerorts im Argen liegt; auch in der Industrie; das betrifft:
  - mehr Delegation von Verantwortung,
  - noch stärkere interdisziplinäre Zusammenarbeit auch zwischen Kunden, Industrie und Hochschule
  - flachere Hierarchien in unseren Unternehmen und
  - die Verantwortung muß da liegen, wo Kompetenz ist.

Wie Sie bemerkt haben werden, fordert die chemische Industrie nicht mehr öffentliche Gelder für **unsere** industrielle Forschung; die bezahlen wir selbst - aber eine solide Grundlagenforschung mit ausreichenden staatlichen Mitteln für die Hochschulen muß vorhanden sein!

Wenn uns nicht entscheidende Fortschritte für den Industrie- und Forschungsstandort in nächster Zeit gelingen, muß ich weitere Konsequenzen aus unternehmerischer Verantwortung für einen weltweiten Konzern ziehen. Wir können uns nicht nochmal den Fehler fauler Kompromisse sowie mangelnde Offenheit oder mangelnde Umsetzung gemeinsam, d.h. zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik, erkannter Probleme leisten.

Mein Fazit lautet, entweder schaffen wir es, gravierende Änderungen und das heißt Deregulierung in Deutschland in die Wege zu leiten, oder die Verdrängung der Chemie aus Deutschland wird an Dynamik zunehmen.

## Autoren


| | |
|---|---|
| Dr. Utz-Hellmuth Felcht | Mitglied des Vorstandes der Hoechst AG, Frankfurt |
| Dipl. Phys. Dieter Rittig | Leiter des Bereichs "Betriebsverhalten" bei der GRS Köln |
| Dr. Manfred Mertins | wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich "Betriebsverhalten" bei der GRS Köln |
| Dr. Werner Bastl | Geschäftsführer beim Institut für Sicherheitstechnologie in Garching. |
| Dr. Klaus Wolfert | Leiter des Bereichs "Thermohydraulik" bei der GRS Garching. |
| Dipl.-Ing. Jürgen Rohde | Leiter Abteilung "Schwere Störfälle" im Bereich "Thermo-hydraulik" bei der GRS Köln |

**Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
**50667 Köln**
Telefon (02 21) 20 68-0
Telefax (02 21) 20 68 442
Telex 2 214 123 grs d

Forschungsgelände
**85748 Garching** b.München
Telefon (0 89) 3 20 04-0
Telefax (0 89) 3 20 04 299
Telex 5 215 110 grs md

Kurfürstendamm 200
**10719 Berlin**
Telefon (0 30) 88 41 89-0
Telefax (0 30) 88 23 655

**ISBN 3-923875-60-6**