Das Risikoproblem in der Technik: Möglichkeiten und Grenzen der Beurteilung technischer Risiken

von

ADOLF BIRKHOFER

1. Technische Sicherheit und Risiko

In der Pharmazie gibt es den Grundsatz: „Was einen Menschen – in zu großer Menge genommen – nicht umbringen kann, das kann ihn – richtig dosiert – auch nicht heilen". Auf die Technik angewandt, heißt das: Alles was wirkt, kann auch schaden.

Wenn dies so ist, was berechtigt uns dann, ein technisches Erzeugnis als „sicher" zu bezeichnen?

Als Mitte 1976 der Elbe-Seiten-Kanal brach, wurde die Bayerische Staatsregierung von besorgten Landtagsabgeordneten gefragt, ob sich ein solcher Dammbruch auch in Bayern ereignen könne. Der zuständige Innenminister teilte nach Überprüfung mit, es bestehe keine Gefahr, die Dämme in Bayern seien „sicher". Knapp drei Jahre später brach ein Damm des Europa-Kanals bei Nürnberg. Die Flutwelle forderte ein Todesopfer und richtete erheblichen Sachschaden an.

Eine Abgeordnete des Landtags hat daraufhin sofort den Vorwurf erhoben, der Innenminister habe das Parlament belogen. Sie hatte offenbar angenommen, daß „sichere" Dämme *auf keinen Fall* versagen können.

Als der Minister die Dämme als „sicher" bezeichnete, meinte er vermutlich: Sie sind nach dem Stand der Technik errichtet und bei der Überprüfung wurden keine Fehler festgestellt, die ein Versagen befürchten lassen müßten. Er hat sich damit so ausgedrückt, wie es allgemein üblich ist. Auch die Eisenbahn wird zu Recht als sicheres Verkehrsmittel betrachtet, obwohl sich von Zeit zu Zeit sogar schwere Unfälle ereignen. Sie sind aber so selten, daß der einzele Reisende kaum damit rechnen muß, davon betroffen zu werden.

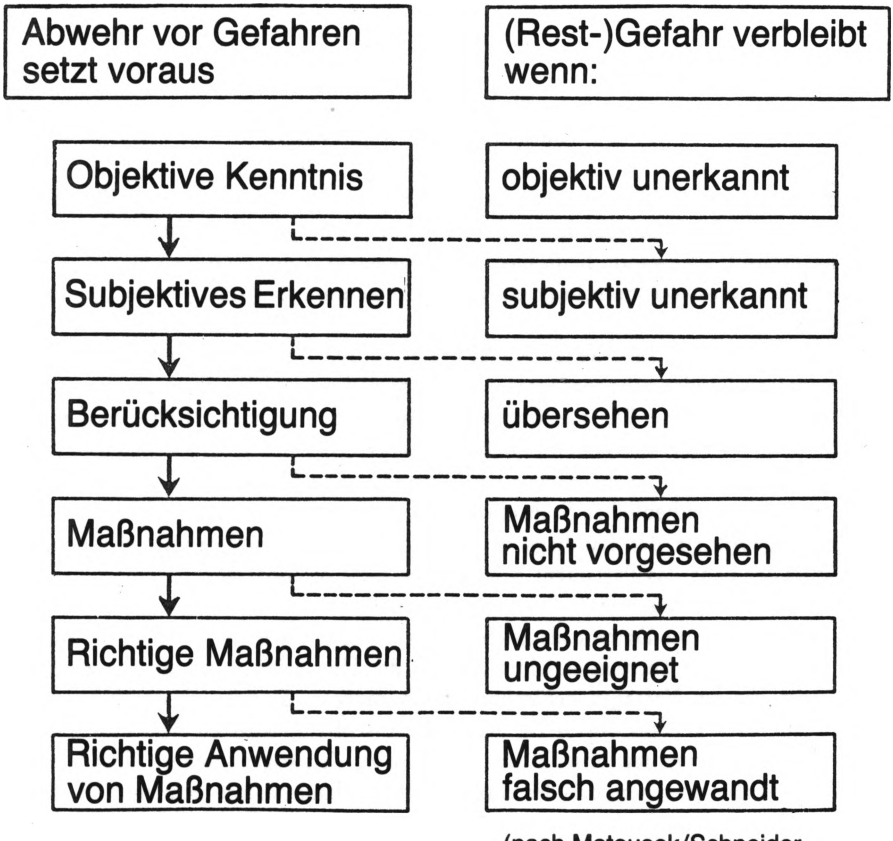
Eine Technik wird also offensichtlich dann als „sicher" bezeichnet, wenn Unfälle nur hinreichend selten auftreten. „Sicherheit" erfordert nicht, daß Unfälle und damit Schäden *absolut* auszuschließen wären.

Der Mensch bedient sich der Technik, um Bedürfnisse zu decken und Wünsche zu befriedigen. Dabei hat er von jeher auch Gefahren hingenommen, vorausgesetzt sie stehen in einem vernünftigen Verhältnis zum erzielten Nutzen.

Wenn Gefahren in der Technik nicht vollständig abgewehrt werden können, so gibt es dafür unterschiedliche Gründe. Bild 1 soll dies verdeutlichen (nach[1]).

Eine gezielte Abwehr von Gefahren ist nicht möglich, wenn sie objektiv nicht bekannt sind, wenn also weder theoretische Kenntnisse noch praktische Erfahrungen über sie vorhanden sind. Aber auch Gefahren, die nach dem allgemeinen Wissensstand bekannt sind, könnten im konkreten Fall dem Ingenieur unbekannt sein oder von ihm übersehen werden.

Man bemüht sich in jeder Technik darum, Erkenntnislücken zu schließen und zu verhindern, daß bekannte Gefahren versehentlich übergangen werden. Die Maßnahmen



(nach Matousek/Schneider ETH Zürich, 1976)

① ABWEHR VON GEFAHREN

[1] *M. Matousek/I. Schneider,* Untersuchungen zur Struktur des Sicherheitsproblems von Bauwerken, Bericht Nr. 59 aus dem Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Febr. 1976, Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart.

reichen von der Grundlagenforschung, die den allgemeinen Wissensstand verbreitern soll, über die gezielte Auswertung von Schadensfällen, den Erfahrungsaustausch innerhalb der gleichen und zwischen verschiedenen Disziplinen und die Erfassung sicherheitstechnischer Anforderungen in Regelwerken bis zur Mehrfachkontrolle der technischen Auslegung.

Gegen Gefahren, die erkannt sind, werden Maßnahmen vorgesehen, soweit die Gefahren nicht als vernachlässigbar eingestuft werden. Maßnahmen können aber nur dann wirksam werden, wenn sie im Prinzip richtig sind und sachgerecht angewandt werden.

In der rechten Spalte des Bildes werden sechs Gründe für ein technisches Versagen unterschieden. Sie reichen von der objektiven Unkenntnis über potentielle Gefahren bis zur falschen Anwendung richtiger Maßnahmen. In fünf der sechs Fälle geht es um Fehlerquellen, die zunächst nicht bekannt sind und sich meist erst im Schadensfall bemerkbar machen. *Bewußt* wird eine Restgefahr nur dann in Kauf genommen, wenn gegen erkannte potentielle Gefahren keine oder nur begrenzte Maßnahmen vorgesehen werden, z.B. weil der erreichbare Sicherheitsgewinn einen unverhältnismäßig hohen Aufwand erfordern würde.

Sicherheit in der Technik beruht vielfach auf dem Prinzip, gegenüber gefährlichen Zuständen Sicherheitsabstände einzuhalten. Die Mindestbelastbarkeit muß mit einem entsprechendem Sicherheitsfaktor über der höchsten zu erwartenden Belastung liegen. Damit sollen mögliche Fehler oder Wissenslücken abgedeckt werden. Die erforderlichen Sicherheitsfaktoren sind meist aufgrund langjähriger Erfahrungen in technischen Regeln festgelegt. Sie hängen im allgemeinen auch von der zu erwartenden Häufigkeit der Belastung und vom Schadensausmaß ab, das bei einem Versagen verursacht werden kann.

Doch auch wenn die vorgeschriebenen Sicherheitsfaktoren eingehalten werden, ist ein Versagen nicht *völlig* auszuschließen. Die zu erwartenden Maximallasten können durch nicht vorhergesehene Umstände überschritten werden, die Belastbarkeit kann geringer sein als angenommen. Zwar wird ein Versagen um so unwahrscheinlicher werden, je höher die Sicherheitsfaktoren angesetzt sind. Letztlich werden aber durch Sicherheitsfaktoren gleichzeitig auch Versagenswahrscheinlichkeiten festgelegt.

Sicherheitsfaktoren beziehen sich in der Regel auf einzelne Bestandteile eines technischen Systems. Sie geben nur begrenzt Auskunft über die Sicherheit komplizierter Systeme, die aus vielen, sich gegenseitig beeinflussenden Bauteilen bestehen. Betrachten wir als Beispiel eine elektronische Schaltung. Hier muß etwa ein Transistor, der die Stromstärke in einem Zweig der Schaltung steuert, für eine berechenbare Verlustleistung ausgelegt sein. Um eine Überlastung zu vermeiden, wird man einen Transistortyp verwenden, der auch eine wesentlich höhere als die berechnete maximale Verlustleistung verträgt. Die Sicherheitsreserve, d.h. der Abstand zum Versagen, läßt sich durch einen einfachen Faktor ausdrücken.

Anders bei der Gesamtschaltung, die z.B. die Aufgabe hat, Informationen zu verarbeiten oder zu übertragen. Die definierte Aufgabe kann u.U. nicht mehr erfüllt werden, wenn einzelne Bauteile versagen, die Spannungsversorgung ausfällt oder ähnliches.

Die Funktion hängt hier vom Zusammenwirken vieler unterschiedlicher Bauteile ab.

Die Sicherheitsreserve, die in die Schaltung „hineingebaut" wurde, kann daher nicht mehr durch einen Sicherheitsfaktor gekennzeichnet werden.

Ein Maß für die Sicherheitsreserve ist aber die Wahrscheinlichkeit, mit der das System bei Anforderung die Fähigkeit besitzt, seine Aufgabe zu erfüllen. Diese Wahrscheinlichkeit wird auch als „Zuverlässigkeit" des jeweils betrachteten Systems bezeichnet.

Die Zuverlässigkeit sagt nichts darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Systemversagen zu Schäden führt und wie groß das Schadensausmaß gegebenenfalls sein könnte. Einen Schritt weiter geht man bei der *Risiko*beurteilung. Hier spielt auch das Schadensausmaß eine Rolle.

Der Begriff „Risiko" stammt aus dem wirtschaftlich-kaufmännischen Bereich. Er wird dort, eher qualitativ, im Sinn von Wagnis oder Verlustgefahr verwendet. Man meint damit die *Möglichkeit*, bei einem Unternehmen Schaden zu erleiden.

In der Umgangsprache bezeichnet man die naheliegende oder unmittelbar drohende Möglichkeit eines Schadens im allgemeinen als „Gefahr". Ist eine Schadensmöglichkeit weniger naheliegend, so spricht man eher von „Risiko". In diesem Sinn wird der Begriff zunehmend auch bei der Sicherheitsbeurteilung technischer Produkte verwendet.

Die Ansichten darüber, wie „Risiko" zu definieren ist, sind nicht einheitlich. Es besteht aber weitgehend Übereinstimmung, daß ein Risiko umso größer ist, je höher Wahrscheinlichkeit und Ausmaß von Schäden sind. Häufig wird als Risiko das Produkt aus Schadensausmaß und Schadenswahrscheinlichkeit bezeichnet, gegebenenfalls summiert über mehrere Schadensereignisse. Man kann sich aber auch darauf einigen, das Risiko durch andere Verknüpfungen der beiden Komponenten Wahrscheinlichkeit und Schadensausmaß darzustellen.

Handelt es sich um ein bestimmtes Schadensausmaß, so kann ein Risiko auch allein durch die Wahrscheinlichkeit gekennzeichnet werden, mit der der Schaden eintritt. Im Mittel kommen etwa 6 von 10 Millionen Personen pro Jahr durch Blitzschlag ums Leben. Das mittlere Individualrisiko für „Tod durch Blitzschlag" beträgt als $6 \cdot 10^{-7}$ pro Jahr.

Es gibt andere Risiken, bei denen das Schadensausmaß sehr unterschiedlich sein kann. So könnte bei einem Zugunglück die Zahl der Verletzten oder der Todesopfer zwischen 0 und mehreren hundert liegen. Man spricht hier von Kollektivrisiken. Sie werden meist durch das Schadensausmaß pro Zeiteinheit, z.B. Todesfälle pro Jahr, bezeichnet.

Wenn Risiken Beiträge aus Ereignissen enthalten, die zwar sehr unwahrscheinlich, gegebenenfalls aber mit großem Schaden verbunden sind, ist für manche Zwecke die Angabe eines mittleren Risikos nicht ausreichend. Durch die Produktbildung zwischen Wahrscheinlichkeit und Schadensausmaß geht – unter Umständen wesentliche – Information verloren. In solchen Fällen ist es daher oft üblich, die Komponenten Häufigkeit und Ausmaß getrennt darzustellen, z.B. in Form von Tabellen oder Kurven. Wir werden später noch Beispiele dafür sehen.

Will man das Risiko als Beurteilungsmaßstab für technische Sicherheit verwenden, so

ist zuerst die Frage zu beantworten: Wie groß und welcher Art sind die Risiken? Das heißt: Die Risiken sind zu ermitteln.

Sodann sind die ermittelten Risiken zu bewerten. Dabei geht es um die Frage: Sind die Risiken zulässig bzw. werden sie geduldet?

2. Risikoermittlung

Technik kann auch, oder gerade dann, mit Risiken verbunden sein, wenn sie fehlerfrei arbeitet. Solche Risiken reichen vom bewußten Mißbrauch bis zu unerwünschten Auswirkungen auf die Umwelt oder auf das gesellschaftliche Zusammenleben.

So wichtig solche Gesichtspunkte sind: Ich will mich hier vor allem mit den Risiken befassen, die bei einem Versagen technischer Erzeugnisse auftreten können, das heißt also mit dem Unfall- oder Störfall-Risiko.

Vielfach können Risiken ermittelt werden, indem man aufgetretene Schadensereignisse statistisch auswertet. Aus Verkehrsstatistiken läßt sich z. B. entnehmen, daß im Jahr 1979 pro 100 km Autobahn 11 Personen tödlich verunglückt sind. Auf anderen Straßen (außer Bundesstraßen) gab es im selben Zeitraum weniger als zwei Verkehrstote pro 100 km Streckenlänge. Daraus könnte man den Schluß ziehen, daß gerade die gut ausgebauten Straßen besonders gefährlich sind. Dies wäre aber voreilig, da es die sehr unterschiedlichen Verkehrsdichten und damit die jährlichen Fahrleistungen nicht berücksichtigt. Tatsächlich kamen auf Autobahnen, bezogen auf die Fahrleistung, fünfmal weniger Menschen ums Leben als auf anderen Straßen.

Je nach Fragestellung kann die eine oder die andere Betrachtungsweise von Interesse sein. Ist z. B. darüber zu entscheiden, wo bevorzugt Rettungsfahrzeuge stationiert werden sollen, kommt es vor allem auf die Zahl der Unfälle pro Streckenlänge an. Die Unfallzahl bezogen auf Fahrleistungen ist dann von Intersse, wenn man wissen will, ob die Fahrt auf der Bundesstraße oder über die Autobahn sicherer ist.

Allerdings wird kaum jemand allein aufgrund von Sicherheitsüberlegungen oder gar anhand von Risikozahlen darüber entscheiden, welche Straße er benützen will.

Die statistische Auswertung von Verkehrsunfällen kann aber sehr nützlich sein, wenn man z. B. nach Ansatzpunkten für technische Verbesserungen an Kraftfahrzeugen sucht oder besonders unfallträchtige Verkehrssituationen ausfindig machen will. Allerdings muß man dazu viel mehr in die Einzelheiten gehen als in dem hier gewählten Beispiel.

Auch in vielen anderen Bereichen der Technik sind Unfall- und Schadensstatistiken ein wichtiges Hilfsmittel, die Sicherheit zu beurteilen und Schwachstellen herauszufinden.

In bestimmten Fällen stößt aber eine empirische Risikoermittlung auf grundsätzliche Schwierigkeiten: wenn es um Schadensereignisse geht, die extrem selten sind, gleichzeitig aber das potentielle Schadensausmaß so groß ist, daß das Risiko trotz geringer Schadenswahrscheinlichkeit nicht von vorneherein vernachlässigt werden kann.

Bei technischen Anlagen, deren Versagen größere Schäden bewirken könnte, wird normalerweise besonderes Gewicht auf die Sicherheit gelegt. Zum Beispiel werden

wichtige Systeme mehrfach eingebaut, die Sicherheitsfaktoren werden höher angesetzt als üblich und der Prüfaufwand ist besonders hoch. Das größere Gefährdungspotential wird so durch höherwertige Sicherheitsmaßnahmen ausgeglichen. Damit wird dem Grundsatz Rechnung getragen, daß das Gefährdungspotential ein Maß für die Anforderungen ist, die an die Sicherheitsmaßnahmen zu stellen sind.

Wenn die Sicherheitsvorkehrungen erfolgreich sind, werden Schäden – wenn überhaupt – sehr selten auftreten. Eine statistische Ermittlung von Unfallrisiken ist dann kaum möglich.

Man kann zwar aufgrund der unfallfreien Erfahrung eine obere Grenze für die Wahrscheinlichkeit von Unfällen abschätzen. Die kumulative Betriebszeit von Leichtwasserreaktoren über 400 MWe beträgt heute über 600 Jahre. Ein Unfall, der zu Gesundheitsschäden durch massive Freisetzung von Spaltprodukten geführt hätte, hat sich in dieser Zeit nicht ereignet. Daraus läßt sich – mit 95-prozentiger Sicherheit – schließen, daß die Häufigkeit eines solchen Unfalls unter 1 : 200 pro Reaktorjahr liegt.

Diese Betrachtungsweise hat drei grundsätzliche Schwächen:

1. Die geschätzte Häufigkeit kann umso weiter vom wahren Wert entfernt sein, je weniger Erfahrungen vorliegen.
2. Aussagen über das mögliche Schadensausmaß, wie sie für eine Risikoermittlung erforderlich sind, können aus der Beobachtung schadensfreier Betriebszeiten nicht gewonnen werden.
3. Ursache und Ablauf von Ereignissen, die zu Schäden führen könnten, werden bei dieser Methode nicht im einzelnen betrachtet. Rückschlüsse auf die Qualität von Sicherheitsmaßnahmen können daher nicht gezogen werden.

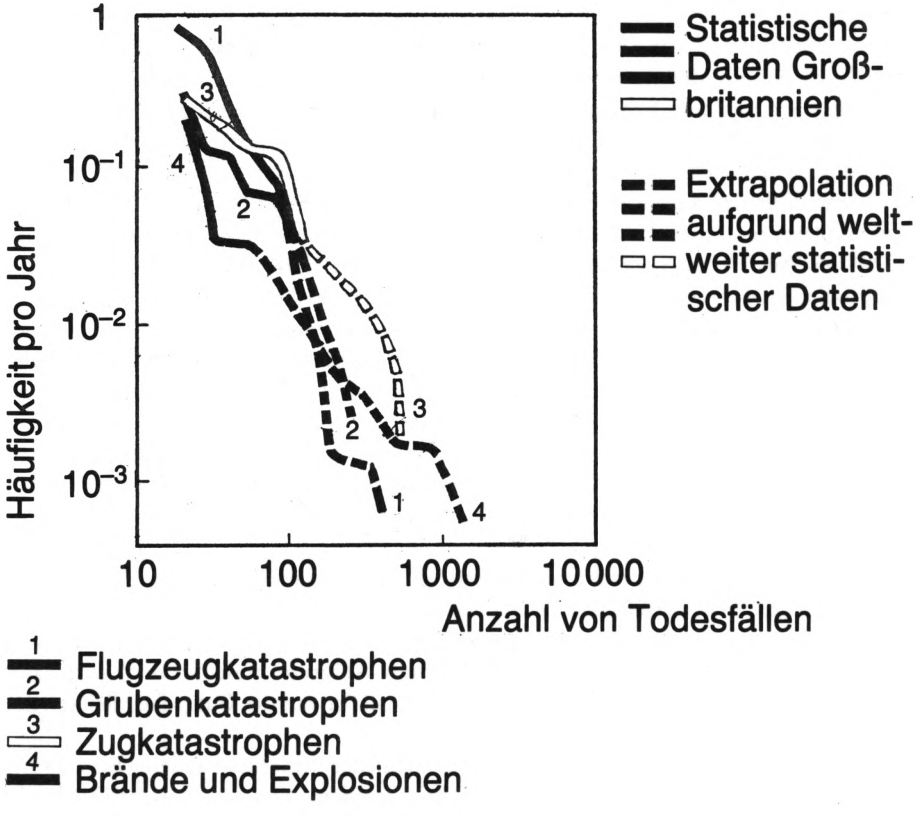
Auch wenn eine Technik bereits Schäden verursacht hat, kann eine rein empirische Risikoermittlung zu Fehlschlüssen führen, vor allem was die Möglichkeit großer Schäden angeht. In allen Techniken mit höherem Gefährdungspotential werden entsprechende Schutzvorkehrungen getroffen, so daß Großschäden oder gar Katastrophen generell nur sehr selten zu erwarten sind. Wenn Schäden jenseits eines bestimmten Ausmaßes nicht aufgetreten sind, bedeutet das daher nicht unbedingt, daß sie undenkbar sind oder naturgesetzlich ausgeschlossen werden können.

Bild 2 zeigt die Häufigkeit für Todesfälle durch verschiedene Unfallarten (nach[2]). Der durchgezogene Teil beruht auf statistischen Daten für Großbritannien. Dort haben z. B. Brände und Explosionen bisher in einem Einzelereignis maximal etwa 50 Todesopfer gefordert, und dies mit einer Häufigkeit von rund einmal in 50 Jahren.

Die Kurven wurden in[2] im gestrichelten Teil auf der Grundlage weltweiter Erfahrungen verlängert. Dabei zeigt sich, das Brände und Explosionen auch mehr als 1000 Todesopfer fordern könnten, wenn auch mit erheblich geringerer Wahrscheinlichkeit. Ähnliches gilt für die anderen Unfallarten.

Die Nachteile einer empirischen Risikoermittlung können weitgehend vermieden werden, wenn man Unfall-Risiken anhand von Detailkenntnissen über die betrachtete

[2] *L. S. Fryer/R. F. Griffiths* Worldwide Data on the Incidence of Multiple Fatality Accidents. SRD-Report R 149, April 1979.



② HÄUFIGKEITSVERTEILUNG FÜR TODESFÄLLE IN GROSSBRITANNIEN

Anlage abschätzt. Dies setzt voraus, daß mögliche Unfallabläufe modellmäßig erfaßt und quantitativ analysiert werden können.

Die umfassendsten Risikoanalysen wurden bisher für Kernkraftwerke durchgeführt. Ich möchte die Vorgehensweise solcher Analysen am Beispiel der „Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke"[3] etwas genauer darstellen.

Kernkraftwerke sind so konstruiert, daß die radioaktiven Spaltprodukte, die während des Betriebs im Brennstoff entstehen, durch mehrere Strukturen eingeschlossen sind. Um ein Versagen dieser Strukturen auch bei Störfällen zu verhindern, werden die Anlagen mit Sicherheitssystemen ausgerüstet.

[3] Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke. Eine Untersuchung zu dem durch Störfälle in Kernkraftwerken verursachten Risiko, Hauptband. Eine Studie der Gesellschaft für Reaktorsicherheit im Auftrage des Bundesministers für Forschung und Technologie, Verlag TÜV Rheinland, 1979.

Eine wesentliche Aufgabe dieser Systeme besteht darin, die Kühlung des Reaktorkerns unter allen Umständen aufrechtzuerhalten. Würde die Kühlung für längere Zeit ausfallen, könnte der Reaktorkern schmelzen. Ein erheblicher Teil der Spaltprodukte würde dann aus dem Reaktorkern in den Sicherheitsbehälter gelangen. Versagt auch noch der Sicherheitsbehälter, so wäre eine massive Spaltproduktfreisetzung in die Umgebung zu erwarten.

Obwohl es das wesentliche Ziel der Sicherheitsmaßnahmen ist, solche Ereignisse zu verhindern, muß man sich in einer Risikoanalyse gerade mit ihnen befassen. Man muß also den Ausfall von Sicherheitssystemen bei Störfällen unterstellen, die resultierenden Störfallabläufe untersuchen und ihre jeweilige Wahrscheinlichkeit ermitteln.

Abhängig davon, ob die verschiedenen Sicherheitssysteme planmäßig eingreifen oder ob sie versagen, kann ein Störfall auf sehr unterschiedlichen Pfaden ablaufen. Um die Vielfalt der möglichen Störfallabläufe überschaubar zu machen, werden sie in Ereignisablaufdiagrammen geordnet dargestellt.

Die Häufigkeit der verschiedenen Abläufe läßt sich dann ermitteln aus der Häufigkeit des Ereignisses, das den Störfall auslöst, und aus den Wahrscheinlichkeiten, mit denen die einzelnen Sicherheitssysteme verfügbar bzw. nicht verfügbar sind.

Die Wahrscheinlichkeiten für Systemausfälle sind bei sehr zuverlässigen Systemen meist nicht aus direkter Erfahrung bekannt. Sie müssen daher analytisch ermittelt werden. Dies geschieht vorwiegend mit Hilfe der Fehlerbaumanalyse.

Der Fehlerbaum stellt in einer logischen Struktur dar, welche Kombinationen von Komponentenausfällen zum Systemausfall führen. Aufgrund dieser Struktur wird dann von der Wahrscheinlichkeit von Komponentenausfällen auf die Wahrscheinlichkeit des Systemausfalls hochgerechnet.

Im Fehlerbaum kann auch der Einfluß menschlicher Fehler und äußerer Einwirkungen auf die Systemzuverlässigkeit berücksichtigt werden.

Die Wahrscheinlichkeit von Komponentenausfällen kann aus Betriebserfahrungen in Kernkraftwerken, oder auch in anderen technischen Anlagen, ermittelt werden. Schwieriger ist die Beurteilung der menschlichen Zuverlässigkeit. Doch kann man auch hier zumindest zu brauchbaren Schätzungen kommen.

In der Studie wurden insgesamt etwa 70 Abläufe im einzelnen untersucht, die einen Beitrag zur Häufigkeit des Kernschmelzens liefern. Als Summenwert ergibt sich eine Häufigkeit für „Kernschmelzen" von rund 1 : 10000 pro Jahr.

Im nächsten Schritt wird der Ablauf von Kernschmelzunfällen innerhalb der Anlage weiterverfolgt.

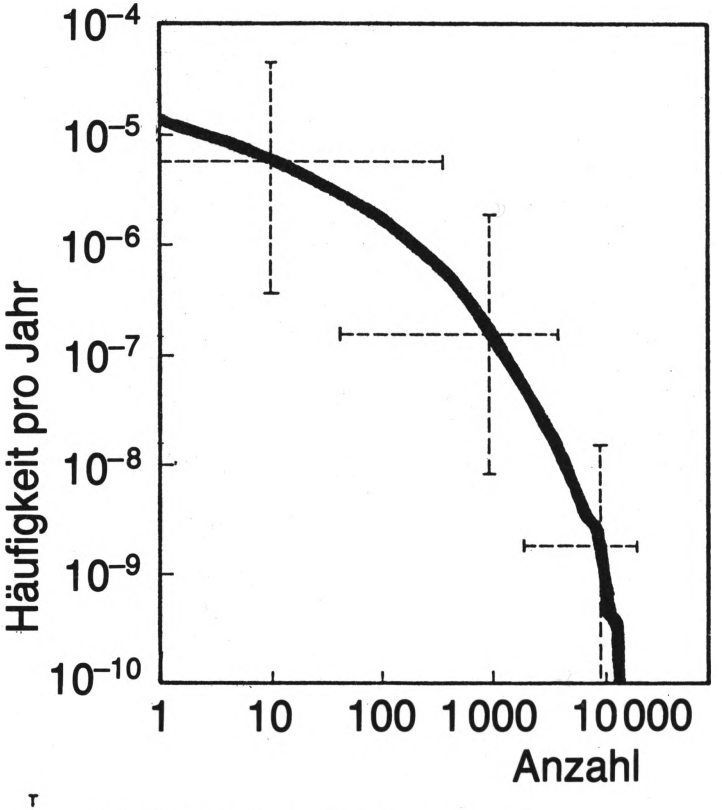
Auch nach einem Schmelzen des Reaktorkerns werden nur dann große Aktivitätsmengen in die Umgebung freigesetzt, wenn der Sicherheitsbehälter undicht wird. Entscheidend für das Ausmaß der Freisetzung sind Zeitpunkt und Art des Sicherheitsbehälter-Versagens. Man untersucht daher mit Simulationsmodellen die Vorgänge beim Schmelzen des Reaktorkerns, die Belastungen und die möglichen Versagensarten des Sicherheitsbehälters, sowie den Spaltprodukttransport im Sicherheitsbehälter. Als Ergebnis dieser Untersuchungen erhält man Häufigkeit und Ausmaß von Aktivitätsfreisetzungen in die Umgebung.

Diese Ergebnisse sind der Ausgangspunkt für die Berechnung der Unfallfolgen.

Zunächst wird die Ausbreitung der aktivitätsführenden Wolke in der Atmosphäre simuliert. Daraus ergeben sich die Aktivitätskonzentrationen in der näheren und weiteren Umgebung des Unfallortes.

Als zufallsbedingte Größen gehen die Wetterbedingungen in diese Rechnungen ein. Neben den Stabilitäts- und Niederschlagsverhältnissen ist vor allem die Windrichtung von Bedeutung. Von ihr hängt entscheidend ab, welches Gebiet und damit wieviele Personen durch den Unfall betroffen werden.

Aus den Aktivitätskonzentrationen werden die Strahlenbelastungen berechnet. Über



90% Vertrauensbereich

③ HÄUFIGKEITSVERTEILUNG FÜR FRÜHE TODESFÄLLE (25 ANLAGEN)

Dosiswirkungsbeziehungen läßt sich schließlich das Ausmaß akuter und latenter Strahlenschäden ermitteln.

Bild 3 zeigt als Beispiel für die Ergebnisse der Studie den Zusammenhang von Schadensumfang und Eintrittshäufigkeit für Todesfälle durch akute Strahlenkrankheit. Die Eintrittshäufigkeiten beziehen sich auf 25 Anlagen.

Es ist anzunehmen, daß radioaktive Strahlung, auch wenn sie keine akuten gesundheitlichen Schäden hervorruft, zu einer latenten Erhöhung des Krebsrisikos führen kann. Die Berechnungen der Studie zu solchen „Spätschäden" möchte ich hier nicht weiter diskutieren.

Mit zunehmendem Schadensausmaß geht die Häufigkeit stark zurück. Unfallabläufe, die mit einem großen Schadensausmaß verbunden sind, sind äußerst unwahrscheinlich. Für Unfälle mit 1000 oder mehr akuten Todesfällen wurden Eintrittshäufigkeiten von weniger als 1 : 1 Mio pro Jahr bei 25 Anlagen ermittelt.

Eine Abschätzung extrem geringer Häufigkeiten ist nur dann möglich, wenn man einen Unfallablauf, wie ich es eben geschildert habe, in Unterereignisse aufgliedert. Die Wahrscheinlichkeit solcher Unterereignisse ist zwar auch gering, sie liegt aber in Bereichen, die man aufgrund von Erfahrungen beurteilen kann.

Störungen, die bei einem Versagen von Sicherheitssystemen schwere Schäden am Reaktorkern verursachen könnten, sind mit einer Häufigkeit von etwa 1 : 10 bis 1 : 1000 pro Reaktor und Jahr zu erwarten. Die Wahrscheinlichkeit, daß Sicherheitssysteme versagen, liegt im Bereich von 1 : 100, bei häufigeren Störfällen eher niedriger. Somit ergibt sich eine Häufigkeit für schwere Kernschäden in der Größenordnung von 1 : 10000 pro Reaktorjahr.

Die Wahrscheinlichkeit für eine frühes Versagen des Sicherheitsbehälters beträgt dann etwa 1 : 100. Multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit für Kernschäden errechnet man damit für eine massive Spaltproduktfreisetzung in die Umgebung eine Häufigkeit von 1 : 1 Mill. pro Jahr.

Dieser Wert ergibt sich aus dem Produkt dreier Wahrscheinlichkeiten. Diese Multiplikation ist allerdings nur dann erlaubt, wenn die Unterereignisse, für die die Wahrscheinlichkeiten ermittelt wurden, voneinander unabhängig sind. Bei einer Risikoanalyse ist daher auch eingehend zu überprüfen, ob Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Unterereignissen bestehen könnten.

Die eingezeichneten gestrichelten Balken in Bild 3 weisen darauf hin, daß es sich bei einer Risikoanalyse der vorliegenden Art um eine Abschätzung handelt, die mit erheblichen Schätzunsicherheiten behaftet ist. Diese Schätzunsicherheiten lassen sich zum Teil quantifizieren. Daraus ergeben sich die hier dargestellten 90%-Vertrauensbereiche.

In der Praxis werden die für die Risikoanalyse benötigten Detailkenntnisse nur unvollständig zur Verfügung stehen. Das betrifft sowohl die Datengrundlage zur Zuverlässigkeitsbeurteilung als auch die modellmäßige Erfassung von Ereignisabläufen.

Es ist dann notwendig und üblich, Wissenslücken durch pessimistische Annahmen zu überbrücken. Dies führt schließlich dazu, daß auch eine Risikoanalyse eine obere Abschätzung des tatsächlichen Risikos liefert, vorausgesetzt es wurden nicht systemati-

sche Fehler gemacht und auf diese Weise wesentliche Risikobeiträge außer acht gelassen.

Trotz dieser methodischen Probleme ist zu erwarten, daß eine Risikoabschätzung anhand von Detailkenntnissen der Realität näher kommt als durch reine Beobachtung schadensfreier Betriebszeiten.

3. Risikobewertung

Will man das Risiko als Maßstab für die erforderliche Sicherheit verwenden, so muß das ermittelte Risiko bewertet und das zulässige Risiko quantitativ festgelegt werden. Die Frage ist, wer diese Festlegung zu treffen hat.

Über den Stand der Technik entscheidet im allgemeinen die Fachwelt. Sie entscheidet damit auch darüber, welche Sicherheit erforderlich ist.

Technische Festlegungen, die die Sicherheit der Bevölkerung berühren, unterliegen zwar häufig einer öffentlichen Kontrolle. Diese Kontrolle legt aber meist keine Sicherheitsziele fest, sie überprüft vielmehr, ob der Stand der Technik beachtet wurde.

Daneben gibt es auch rein behördliche Sicherheitsvorschriften, denken wir nur an Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Straßen oder die Pflicht, Sicherheitsgurte zu verwenden. Dabei geht es aber immer darum, offensichtliche Gefahren einzudämmen, nicht aber festgelegte Risikogrenzwerte einzuhalten.

Das geforderte Sicherheitsniveau stellt sich dabei durch eine Art Iteration heraus. Treten Schäden zu häufig auf, werden die Vorschriften verschärft, ohne daß aber das Sicherheitsniveau selbst festgeschrieben wird.

Durch Risikogrenzwerte wird festgelegt, welcher Schaden mit welcher Häufigkeit verursacht werden darf, wie dies faktisch auch durch andere Sicherheitsregeln und -vorschriften geschieht. Dennoch haben Risikogrenzwerte eine andere psychologische Qualität. Der Zusammenhang zwischen technischer Sicherheit und möglichen Schäden wird evident. Dies führt letztlich zur Forderung, daß die direkt Betroffenen oder zumindest demokratisch legitimierte Gremien über das zulässige Risiko zu entscheiden haben.

Auch wenn man diese Forderung grundsätzlich für berechtigt hält, bleibt fraglich, in welcher Weise und auf welcher Grundlage solche Festlegungen getroffen werden können.

An welchen Maßstäben können technische Risiken gemessen werden?

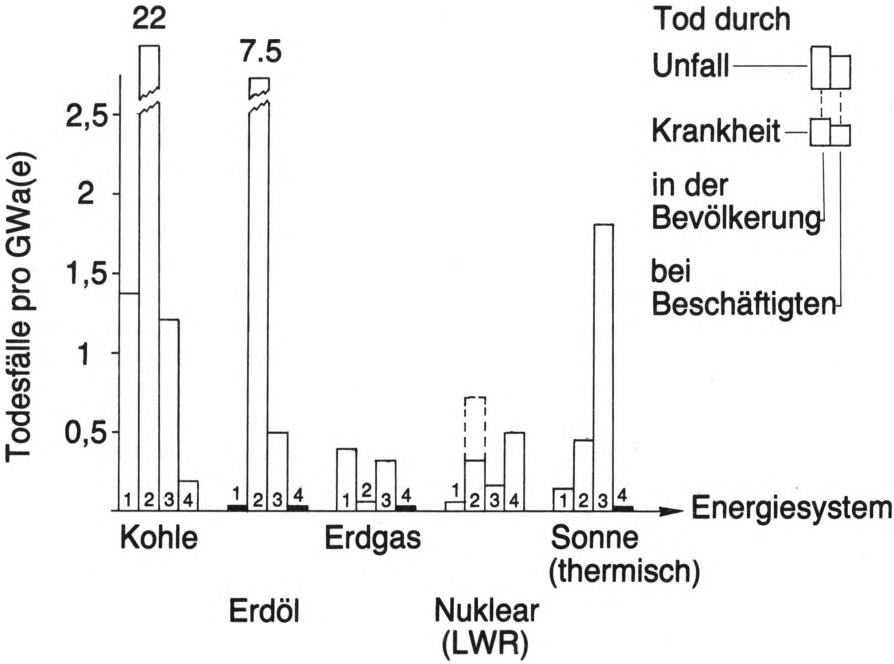
Naheliegend ist es vor allem, Risiken solcher Techniken miteinander zu vergleichen, mit denen der gleiche Zweck verfolgt wird, z. B. die Risiken verschiedener Systeme zur Bereitstellung elektrischer Energie. Dies hat den Vorteil, daß man ohne weiteres eine einheitliche Bezugsgröße zur Verfügung hat, z. B. ein Gigawatt-Jahr erzeugte elektrische Energie. An dem Beispiel der Unfallhäufigkeit auf verschiedenen Straßen haben wir gesehen, wie wichtig die Bezugsgröße für eine Risikobewertung sein kann.

Allerdings können bei den verschiedenen Energiesystemen sehr unterschiedliche Schadensarten auftreten. Im Gegensatz zu Kernkraftwerken gibt es bei Verbrennungs-

kraftwerken kaum ein Unfallrisiko, das die Bevölkerung betreffen könnte, wenn man Unfälle beim Brennstoff-Transport außer Betracht läßt. Verbrennungskraftwerke geben aber – verglichen mit Kernkraftwerken – auch im ungestörten Betrieb erhebliche Mengen an Schadstoffen in die Umgebung ab, die latente, aber auch akute, Gesundheitsschäden verursachen können. Dazu kommen große Mengen an Kohlendioxid, die praktisch nicht zurückgehalten werden können und langfristig möglicherweise das Klima ungünstig beeinflussen.

Es dürfte schwierig sein, einen einheitlichen Maßstab für Unfallrisiken der Kernenergie einerseits und latente Gesundheitsrisiken oder das Kohlendioxid-Risiko bei Verbrennungskraftwerken andererseits zu finden.

Man hat versucht, die Gesundheitsrisiken durch verschiedene Energiesysteme auf



④ TODESFÄLLE PRO ERZEUGTE EL. ENERGIE FÜR VERSCHIEDENE ENERGIESYSTEME (nach Black/Niehaus 1980)

einen Nenner zu bringen;[4,5] Bild 4 (nach[5]) zeigt ein typisches Ergebnis solcher Untersuchungen.

Aufgetragen ist die Zahl der Todesfälle pro Gigawatt-Jahr erzeugte elektrische Energie für Kohle-, Öl- und Gaskraftwerke, für Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktor und für solarthermische Kraftwerke. Ein Gigawatt-Jahr entspricht etwa der elektrischen Energie, die ein großes Kernkraftwerk in einem Jahr erzeugt.

Es wird jeweils unterschieden zwischen Todesfällen in der allgemeinen Bevölkerung und bei Beschäftigten und zwar jeweils durch Unfall oder durch Krankheit. Die Zahlen enthalten nicht nur Risiken aus dem Betrieb der Anlagen selbst. Berücksichtigt wurden auch Schadensfolgen aus der Bereitstellung des Brennstoffs und aus der Errichtung der Anlagen, einschließlich der Produktion der Rohstoffe wie Stahl, Aluminium, Glas, Zement und dergleichen.

Bei Sonnenkraftwerken ist es sogar so, daß der weit überwiegende Risikobeitrag aus der Errichtung der Anlagen entsteht, da der Materialeinsatz hier sehr hoch ist. Der Betrieb der Anlagen bringt dagegen nur noch geringe Risiken mit sich.

Bei Kohlekraftwerken wird ein vergleichsweise sehr hohes Risiko durch die Schadstoffbelastung der Umwelt beim Normalbetrieb verursacht. Das Unfallrisiko für die Bevölkerung ergibt sich vor allem aus dem Brennstofftransport.

Die Veröffentlichung,[5] auf der Bild 4 beruht, berücksichtigt bei Kernkraftwerken kein Unfallrisiko. Ergänzt man das Bild anhand der „Deutschen Risikostudie", [3] so erhält man den gestrichelt eingetragenen Wert.

Derartige Risikoberechnungen enthalten natürlich erhebliche Unsicherheiten. Daher sollte man die Ergebnisse nur mit entsprechender Vorsicht verwenden. Ich wollte damit auch nur zeigen, auf welche Weise man versucht, zu objektiven Risikomaßstäben zu kommen. Die Untersuchungen stehen erst am Anfang, vor allem was nicht-nukleare Energiesysteme angeht, und man wird noch einige Mühe darauf verwenden müssen, wenn man zu verläßlichen Aussagen kommen will. Andere Wege, Risiken zu bewerten, könnten darin bestehen, Risiken einer Technik mit ihrem Nutzen zu vergleichen oder den Aufwand für eine Risikoverminderung dem Sicherheitsgewinn gegenüberzustellen.

In beiden Fällen steht man oft vor dem Problem, daß nicht-materielle Schäden gegen wirtschaftliche Vorteile oder wirtschaftlichen Aufwand abzuwägen sind. Auch der Nutzen einer Technik läßt sich nicht immer in Mark und Pfennig ausdrücken, so daß hier zwangsläufig subjektive Wertungen ins Spiel kommen.

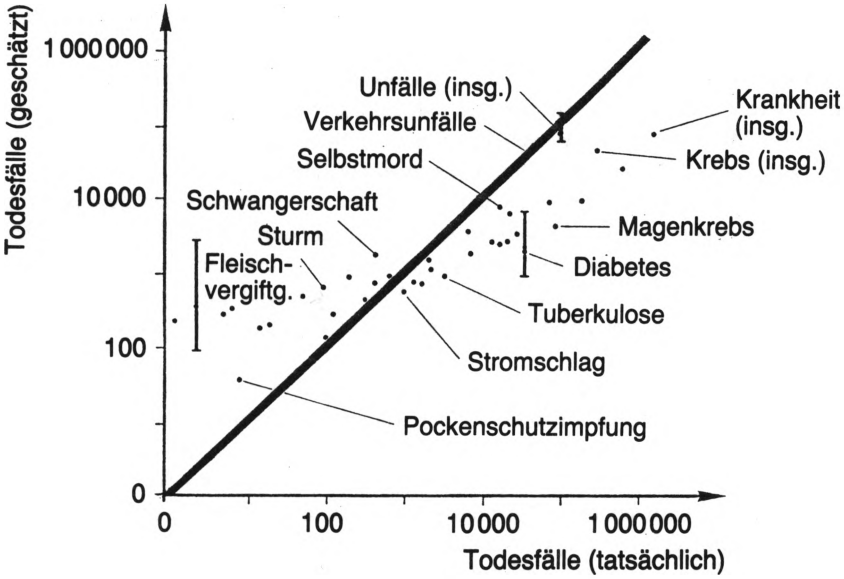
Die öffentlichen Auseinandersetzungen über die Kernenergie waren wohl der Anlaß, zu untersuchen, wie Risiken empfunden und unter welchen Voraussetzungen sie toleriert werden.

Wie weit die Einschätzung von Risiken von ihrem wahren Wert entfernt sein kann, zeigt Bild 5 (nach[6]).

[4] *H. Inhaber,* Risk of Energy, AECB-1119/Rev. 2, 1978.

[5] *S. C. Black/F. Niehaus,* Comparsion of Risks and Benefits among Different Energy Systems, Proc. Int. Workshop on „Energy/Climate Interactions", Münster, March, 3–7, 1980, Reidel Publishing Co., Dordrecht, Boston.

[6] *P. Slovic/S. Lichtenstein/B. Fischhoff,* Images of Disaster: Perceptions and acceptance of risks from nuclear power. Proc. 15th Annual Meeting of the Nat. Council on Radiation Protection and Measurements, 1979.



⑤ VERGLEICH ZWISCHEN TATSÄCHLICHER UND GESCHÄTZTER ZAHL VON TODESFÄLLEN DURCH VERSCHIEDENE URSACHEN (USA) (NACH SLOVIC, LICHTENSTEIN, FISCHHOFF 1979)

Nach rechts ist die jährliche Zahl von Todesfällen in den USA durch verschiedene Ursachen aufgetragen, wie man sie aus der Statistik feststellen kann. Nach oben sind für dieselben Zahlen Schätzwerte aufgetragen, die aus der Befragung verschiedener Bevölkerungsgruppen gewonnen wurden. Stimmt die geschätzte mit der tatsächlichen Zahl überein, so liegt der entsprechende Punkt auf der durchgezogenen Linie. Wird der tatsächliche Wert überschätzt, liegt der Punkt oberhalb der Linie und umgekehrt.

Man kann aus diesem Bild den Schluß ziehen, daß gerade die häufigsten Todesursachen unterschätzt werden, während sehr seltene Todesursachen, wie die Fleischvergiftung, zum Teil kräftig überschätzt werden.

Bei der Risikobewertung spielen subjektive Momente offenbar eine ganz entscheidende Rolle. So werden Risiken im allgemeinen unterschätzt, wenn sie ihrem Wesen nach vertraut sind, freiwillig eingegangen werden und vermeintlich beeinflußbar sind, besonders wenn sie nicht sofort wirksam werden und im Schadensfall nur einzelne Personen betreffen. Typisch dafür ist das Gesundheitsrisiko durch Rauchen.

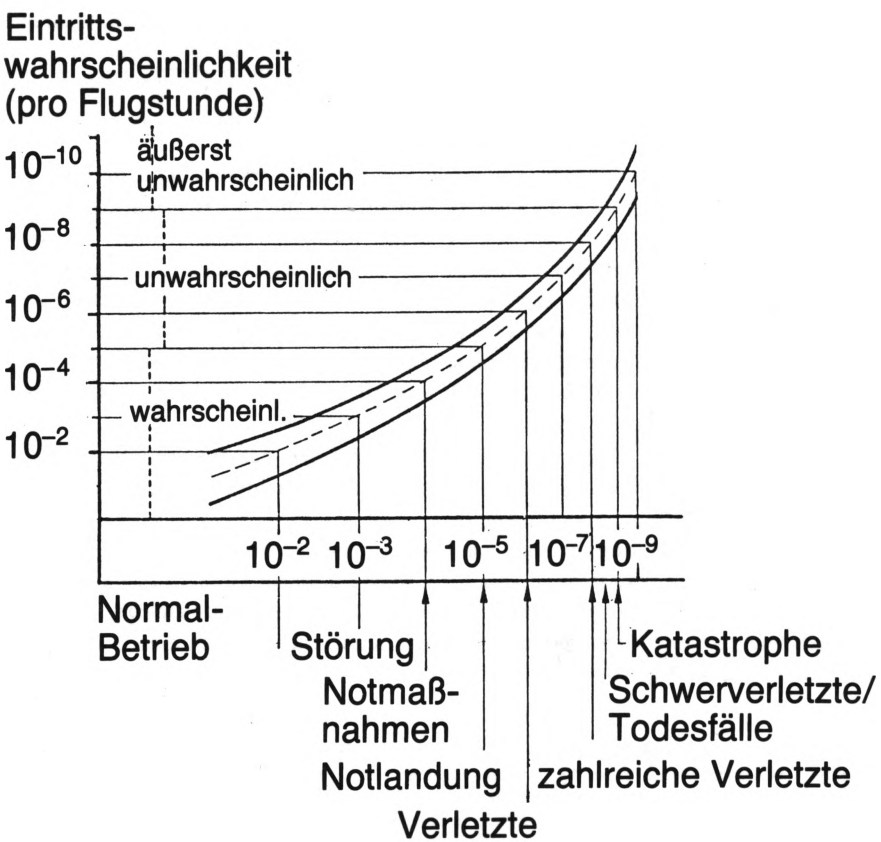
Dagegen werden Risiken mit den gegenteiligen Eigenschaften für besonders bedrohlich gehalten, d.h. also wenn sie neuartig und unfreiwillig sind, wenn man sie für nicht

beeinflußbar hält und Schäden praktisch unverzögert wirksam werden, vor allem aber wenn sie größere Personengruppen gleichzeitig betreffen können. Alle diese Eigenschaften treffen auf die Kernenergie zu, oder sie werden ihr zumindest zugeschrieben.

Ich wollte mit diesen Beispielen einige der Schwierigkeiten aufzeigen, die bei einer Risikobewertung auftreten können. Damit soll aber nicht der Eindruck erweckt werden, eine Risikobeurteilung sei grundsätzlich ungeeignet, zur Entscheidungsfindung beizutragen.

Im Gegenteil. In manchen Bereichen der Technik hat man bereits heute mehr oder weniger verbindliche Festlegungen über zulässige Risiken getroffen.

So gibt es für die Zulassung von Verkehrsflugzeugen Richtlinien darüber, wie häufig technisches Versagen zu bestimmten Konsequenzen führen darf. Bild 6 zeigt eine



⑥ HÄUFIGKEITS-KONSEQUENZEN-GRENZKURVE FÜR VERKEHRSFLUGZEUGE

Grenzkurve für die Häufigkeit von Schadensfolgen, wie sie in den USA und im wesentlichen gleichartig auch bei uns verwendet wird.[7,8] Der Antragsteller hat der Zulassungsbehörde z. B. nachzuweisen, daß technisches Versagen, das zur Katastrophe führen würde, höchstens einmal pro einer Milliarde Flugstunden auftritt. Für weniger schwerwiegende Folgen werden höhere Häufigkeiten toleriert.

Die angegebenen Wahrscheinlichkeiten beziehen sich auf einzelne technische Systeme eines Flugzeugs, nicht auf die gesamte Maschine. Die Wahrscheinlichkeit menschlichen Versagens ist in diesen Zahlen nicht berücksichtigt. Hier ist der Behörde nachzuweisen, daß die Anforderungen, die im normalen Flugbetrieb und bei Störungen an das Personal gestellt werden, unter vernünftigen Annahmen erfüllbar sind.

Der Erfahrungswert für die Absturzhäufigkeit von Verkehrsflugzeugen liegt bei Linienflügen im Bereich 1 zu 10 Mill. pro Flugstunde.

In Bild 6 sind nur die Eintrittswahrscheinlichkeiten in Zahlen angegeben, während die Schadensfolgen qualitativ bezeichnet werden. Es handelt sich also nicht um eine vollständig quantitative Risikogrenzkurve, sondern um Zuverlässigkeitsgrenzwerte, die sich auf bestimmte, qualitativ bezeichnete Konsequenzen beziehen.

Ähnlich geht man auch in anderen Fällen vor.

Mitte der sechziger Jahre hat man überlegt, ob man die Verkehrsdichte im Flugverkehr über dem Nordatlantik erhöhen kann, indem man die vorgeschriebenen Sicherheitsabstände zwischen den einzelnen Flugzeugen verringert.[9] Um zu einer Entscheidung zu kommen, hat man das Kollisionsrisiko – oder besser gesagt: die Kollisionswahrscheinlichkeit – in Abhängigkeit von den Sicherheitsabständen in seitlicher Richtung sowie in Höhen- und Längsrichtung untersucht. Aufgrund von Vergleichen mit der Häufigkeit von Abstürzen durch andere Ursachen war entschieden worden, daß die zulässige Kollisionswahrscheinlichkeit z. B. in seitlicher Richtung nicht größer als 0.2 pro 10 Mill. Flugstunden sein darf.

Diese Begrenzung des Kollisionsrisikos hatte zur Folge, daß ein Seitenabstand von 220 km, wie er schon vorher einzuhalten war, als sicher betrachtet wurde, nicht aber der geplante geringere Abstand von 170 km.

Ein anderes Beispiel bezieht sich auf den Hochwasserschutz in den Niederlanden[10,11]. Nach der Flutkatastrophe von 1953 wurde dort ein Gesetz beschlossen, das Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Schutzdeichen enthält. Deiche, die wirtschaftlich wichtige und dicht besiedelte Gebiete schützen, sind nach diesem Gesetz so zu gestalten, daß sie höchstens mit einer Wahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr überflu-

[7] Federal Aviation Authority (USA), Federal Aviation Regulation, Part 25, Suppl. No. 23, May 1970.

[8] *L. Meyer,* Sicherheitsbetrachtungen für Verkehrsflugzeuge unter Anwendung probabilistischer Methoden. Unveröff. Manuskript eines Vortrags bei der Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Garching, 22. 7. 1980.

[9] *A. C. Busch/B. Colamosca,* Entscheidungsfindung in Flugsicherungssystemen durch Abschätzung des Kollisionsrisikos und wirtschaftliche Verbesserung. BMFT-Seminar über Risiko- und Sicherheitsforschung, Romrod/Alsfeld, 9.–12. 9. 1980.

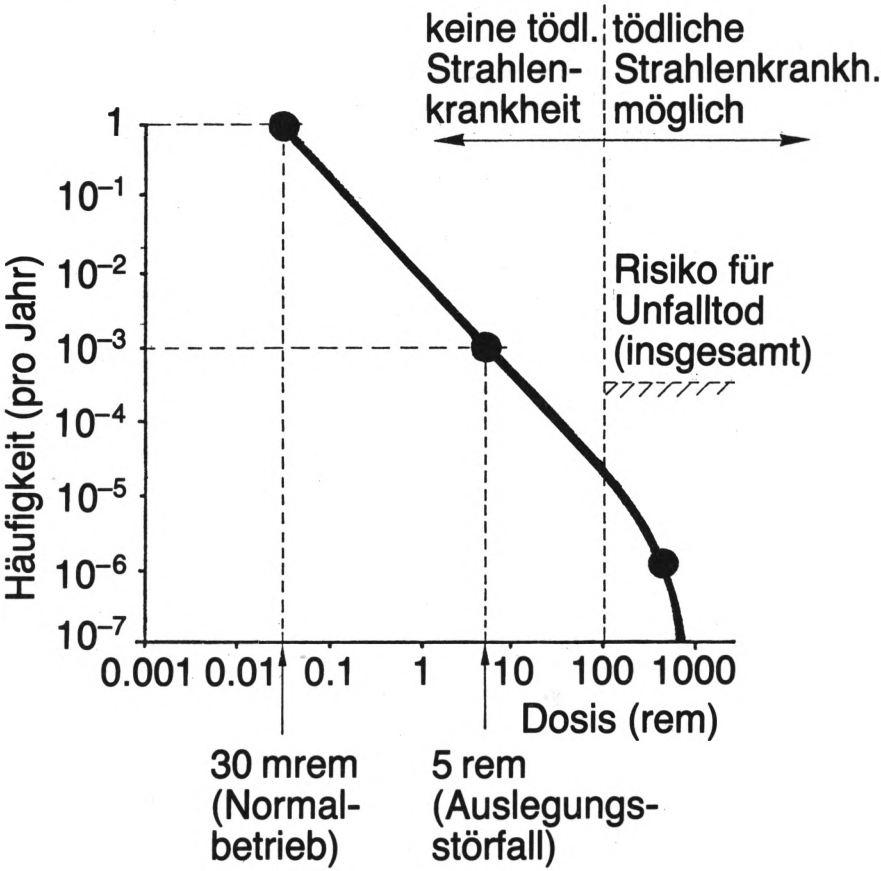
[10] *F. R. Farmer,* Über die Notwendigkeit, Ausgewogenheit bei der Ermittlung des Risikos in einer Industriegesellschaft zu erreichen. BMFT-Seminar über Risiko- und Sicherheitsforschung, Romrod/Alsfeld, 9.–12. 9. 1980.

[11] Persönl. Mitteilung (Jan. 1981): *J. Versteeg,* Ministeri van sociale Zaken, Voorburg, Niederlande.

tet werden. Für wirtschaftlich weniger wichtige Gebiete wird eine viermal höhere Wahrscheinlichkeit akzeptiert. Das führt dazu, daß die Deiche dort etwa einen halben Meter niedriger sein können.

Auch hier wird also die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses, das Schaden verursacht, auf einen Höchstwert begrenzt, das Schadensausmaß aber nur qualitativ beschrieben.

In den USA werden zur Zeit Risikogrenzwerte für die Sicherheitsbeurteilung von Kernkraftwerken diskutiert [12]. Nach dem Vorschlag einer Kommission soll die Wahrscheinlichkeit für erhebliche Schäden am Reaktorkern, über die gesamte Betriebsdauer einer Anlage genommen, kleiner als 1:100 sein, die Wahrscheinlichkeit für ein Kern-



⑦

[12] U.S. Nuclear Regulatory Commission/Advisory Committee on Reactor Safeguards, An Approach to Quantitative Safety Goals for Nuclear Power Plants. NUREG-0739, October 1980.

schmelzen kleiner als 1:300. Dies entspricht einer Häufigkeit von 10^{-4} pro Betriebsjahr für Kernschmelzen.

Eine unkontrollierte Spaltproduktfreisetzung aus dem Sicherheitsbehälter soll um den Faktor 1:100 unwahrscheinlicher sein, d.h. die Häufigkeit hierfür soll unter 10^{-6} pro Reaktor und Jahr liegen.

Das Individualrisiko für Personen in der Umgebung der Anlage soll beschränkt sein auf höchstens 10^{-6} pro Jahr für Tod durch akute Strahlenkrankheit und auf höchstens $5 \cdot 10^{-6}$ für Tod durch strahleninduzierten Krebs.

Daneben soll das Kollektivrisiko, ausgedrückt durch die Zahl von Todesfällen pro erzeugte elektrische Energie, begrenzt werden. Diese Risiken sollen weiter reduziert werden, wenn es mit vertretbarem Aufwand möglich ist. Auch hierfür werden quantitative Kriterien vorgeschlagen.

Ich halte es allerdings für fraglich, ob die Risikoermittlung beim heutigen Stand verläßlich genug ist, um solche doch sehr detaillierten Kriterien anzuwenden.

Es wäre wohl vernünftiger, einfachere Kriterien festzulegen, die als Richtlinie für die Sicherheitsbeurteilung dienen könnten. Einen Vorschlag hierzu zeigt Bild 7.

Durch die Kurve wird die Häufigkeit begrenzt, mit der bestimmte Strahlenbelastungen aufteten dürfen. Sie geht vom Grundsatz aus, daß bestehende Gesundheits- und Unfallrisiken durch ein Kernkraftwerk nicht wesentlich erhöht werden dürfen.

Durch die Strahlenschutzverordnung wird die jährliche Ganzkörperdosis durch den Normalbetrieb eines Kernkraftwerks auf 30 mrem (jeweils über Abluft und Abwasser) begrenzt. Dies entspricht etwa einem Zehntel der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenbelastung. Die tatsächliche Strahlenbelastung durch Kernkraftwerke liegt selbst an ungünstigen Einwirkungsstellen weit unter diesem Grenzwert.[13]

Für Auslegungsstörfälle begrenzt die Strahlenschutzverordnung die zulässige Strahlenbelastung auf höchstens 5 rem. Eine Häufigkeit von $6 \cdot 10^{-3}$ pro Jahr für einen solchen Auslegungsstörfall würde daher den Jahresgrenzwert für die Belastung durch den Normalbetrieb verdoppeln.

Setzt man eine obere Häufigkeit von 10^{-3} pro Jahr für Auslegungsstörfälle fest, so bliebe damit ein ausreichender Sicherheitsabstand zur Verdoppelung der Belastung durch den Normalbetrieb gewährleistet.

Für Unfälle, bei denen die Folgen eines Auslegungsstörfalls überschritten werden, sollte zwischen akuten und latenten Strahlenschäden unterschieden werden.

Von Strahlenbelastungen bis zu etwa 100 rem ist nicht zu erwarten, daß eine tödliche Strahlenkrankheit verursacht werden kann. Eine Dosishäufigkeitsgrenzkurve kann daher für Strahlenbelastungen bis zu 100 rem ähnlichen Grundsätzen folgen wie für den Auslegungsgrenzwert von 5 rem.

Durch eine Dosis von 100 rem wird das durchschnittliche Individualrisiko für Tod durch Krebserkrankung von etwa 20 auf 21% erhöht.

[13] Der Bundesminister des Innern, Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahre 1978. Bericht der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag. Deutscher Bundestag, 8. Wahlperiode, Drucksache 8/4101, 22. 5. 1980.

Für akute gesundheitliche Schäden, die zum Tode führen, könnte man das durchschnittliche Unfallrisiko als Maßstab verwenden. Das Individualrisiko für Tod durch Unfall beträgt etwa 10^{-4} pro Jahr. Eine Zunahme dieses Risikos um 1% aufgrund von Unfällen in Kernkraftwerken erscheint akzeptabel, auch wenn man berücksichtigt, daß die Folgen eines Kernkraftwerkunfalls zeitlich und lokal konzentriert auftreten könnten. Diese Überlegung führt zu einer Häufigkeit von etwa 10^{-6} pro Jahr für eine Strahlenbelastung von 500 rem.

Die Dosis-Häufigkeits-Kurve in diesem Bild bezieht sich auf das Individualrisiko für eine Person, die in besonders ungünstiger Lage zu einem Kernkraftwerk wohnt. Auf diese Weise wird implizit das durchschnittliche Individualrisiko auf deutlich niedrigere Werte begrenzt.

Es wäre zu diskutieren, ob zusätzlich eine Begrenzung des Kollektivrisikos notwendig ist. Allerdings ist zu erwarten, daß mit dem Individualrisiko gleichzeitig auch das Kollektivrisiko in ausreichendem Maße begrenzt wird.

Außer in der Kerntechnik gibt es vor allem in der Chemie einige Beispiele für mehr oder weniger umfassende Risikountersuchungen: In Schweden hat man die Risiken für einen geplanten Flüssiggas-Hafen untersucht, in England die Risiken aus einem großen petrochemischen Industriekomplex östlich von London, in den Niederlanden für ähnliche Anlagen im Gebiet von Rotterdam. Aus den USA sind z. B. Untersuchungen über Risiken des Chlor-Transports bekannt.

Solche Untersuchungen können auch dazu dienen, einen Maßstab für zukünftige Risikogrenzwerte zu finden. Für den Ingenieur liegt jedoch ihr Nutzen weniger in einem pauschalen Risikonachweis. Ihm dienen Risikoanalysen vor allem dazu, Unfallabläufe zu studieren, bevor sie sich ereignet haben, und hieraus auf Verbesserungsmöglichkeiten zu schließen, um Unfälle zu verhindern oder ihre Schadensfolgen zu begrenzen.

4. Zusammenfassung

Ich möchte versuchen, die wesentlichen Gesichtspunkte zusammenzufassen.

Sicherheit für Mensch und Umwelt ist ein wichtiges Ziel bei der Anwendung jeder Technik. Dieses Ziel ist in aller Regel nicht vollständig erreichbar.

Als Maßstab für technische Sicherheit kann das Risiko verwendet werden, das mit dem Einsatz der Technik verbunden ist. Gegenüber Sicherheitsfaktoren oder Zuverlässigkeitsaussagen hat dies den Vorzug, daß auch kompliziertere Systeme beurteilt werden können und die Konsequenzen eines technischen Versagens in die Beurteilung einbezogen werden.

Die Methoden, Risiken zu bestimmen, stehen grundsätzlich zur Verfügung. Die Ergebnisse können allerdings, besonders für neuere Techniken, mit erheblichen Unsicherheiten verbunden sein. Brauchbare Risikoanalysen setzen eine eingehende Systemkenntnis voraus. Außerdem sollten Betriebserfahrungen mit der zu beurteilenden oder zumindest ähnlichen Anlagen vorhanden sein.

Bei einer Festlegung zulässiger Risiken ist zu berücksichtigen, daß Risiken subjektiv sehr unterschiedlich und abweichend von ihrer objektiven Größe empfunden werden.

Risikovergleiche werden dadurch erschwert, daß unterschiedliche Schadensarten auftreten können, die nur schwer mit gleichen Maßstäben zu messen sind.

Wegen der Unsicherheit der Risikoermittlung und der Probleme einer Risikobewertung, sollte eine Risikobeurteilung nicht als Ersatz, sondern als Ergänzung für die klassischen Methoden der Sicherheitsbeurteilung verwendet werden.