

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizer Ingenieur und Architekt
<b>Herausgeber:</b>	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
<b>Band:</b>	107 (1989)
<b>Heft:</b>	23
<b>Artikel:</b>	Heutige Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren: Entwicklung des Sicherheitsstandards und Entwicklungspotential
<b>Autor:</b>	Häusermann, Rudolf
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-77116">https://doi.org/10.5169/seals-77116</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 22.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Fortschrittliche Kernreaktoren

# Heutige Kernkraftwerke mit Leichtwasserreaktoren

Entwicklung des Sicherheitsstandards und Entwicklungspotential

**Wie andere technische Ausrüstungen (Fabriken, Häuser, Brücken, Straßen) sind auch Kernkraftwerke unserer Rechtsordnung unterstellt, welche in Bundesgesetzen über Sicherheit von technischen Einrichtungen und Geräten (STEG) formuliert ist. Der Begriff «Anerkannte Regeln der Technik» spielt darin eine wichtige Rolle in der Beurteilung der Sicherheit bzw. der Anwendung des entsprechenden Sicherheitsstandards. Es sind naturwissenschaftliche Regeln, Erkenntnisse und Methoden sowie quantitative und qualitative Angaben, die in der Praxis erprobt sind und sich bewährt haben. Deren Einhaltung gewährleistet, dass Konstruktion, Herstellung und Betrieb von technischen Einrichtungen und Geräten dem «Anerkannten Stand der Technik» entsprechen. Ein Kernkraftwerk besteht aus Gebäuden, in welchen mit Hilfe von elektromechanischen Ausrüstungen die im Reaktor durch Kernspaltung erzeugte Wärme in elektrischen Strom umgewandelt oder direkt als Wärmeenergie den Verbrauchern zur Verfügung gestellt wird. Bei diesem Prozess entstehen auch «Abfallprodukte» wie Abwärme oder radioaktive und herkömmliche Rückstände, deren Handhabung und Entsorgung ebenfalls auf Bundesebene geregelt ist.**

### Geschichtlicher Rückblick der Rechtsordnung und deren Normen

Sicherheit ist ein Grundbedürfnis des Menschen, deshalb schützt er sich gegen bedrohende und zerstörerische

VON RUDOLF HÄUSERMANN,  
LEIBSTADT

Ereignisse. Gleichzeitig will er die von Menschenhand geschaffenen Mittel, in unserem Fall technische Ausrüstungen, zu seinem Vorteil nutzen.

Die von der Bevölkerung geäußerten Sicherheitsansprüche schlagen sich in den Sicherheitsstandards nieder. Durch die Entwicklung der Technik haben sich auch die an ein Kernkraftwerk gestellten Sicherheitsansprüche gewandelt.

Ein jeder Kernkraftbetreiber hat sich, um eine Betriebsbewilligung zu erhalten, an die festgelegten Gesetze des Bewilligungsverfahrens zu halten. Damit diese Abwicklung ordnungsgemäß funktioniert, haben der Bund, die Kantone und Gemeinden «Prüforgane» (Behörden) eingesetzt. Die von den Behörden gemachten Auflagen für den Bau und den Betrieb von Kernkraftwerken sind von den Herstellern und Lieferanten zu erfüllen. Zwischen Lieferanten und Betreibern werden die Anforderungen in Werkverträgen formuliert.

Sollten sich in der Abwicklung (Bild 1) bei einer Kontrolle durch Behörden und/oder Betreiber Ungereimtheiten zeigen, so sind diese zu beheben. Streitigkeiten werden nach der jeweils gültigen Rechtsnorm behandelt. Bau- und Betriebsrisiken werden gemessen am Risiko (Häufigkeit und Ausmass von Ereignissen) durch Versicherungen [1] abgedeckt. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Gesetze, Verordnungen, Erlasse, Vorschriften, Normen aufgezeichnet.

Die erste internationale Konferenz für den friedlichen Gebrauch der Atomenergie in Genf (1955) hat auch den Sicherheitsstandard für Nuklearanlagen der Schweiz geprägt. Die Bevölkerung und die Behörden wurden auf die Chancen und die damit verbundenen Risiken aufmerksam gemacht. Der wichtigste Entscheid, der damals von Wissenschaftlern und Ingenieuren gefasst wurde, war: Das unvermeidliche Nebenprodukt der Kernspaltung, die radioaktiven Isotope, sind nicht durch Verdünnung und Feinverteilung in die natürliche Umgebung zu entsorgen, sondern, im Gegensatz zur «üblichen» herkömmlichen Praxis, durch Aufkonzentrieren, systematisches Einsammeln nach Gefahrenklasse und Einschliessen in Behältern endlagerungsbereit zu verpacken. Ebenfalls der Genfer Konferenz entspringt die Idee, ein europäisches Zentrum zu schaffen, wo die Aufbereitung von bestrahlten Brennelementen vorgenommen werden soll. In

Mol (Belgien) wurde das Projekt verwirklicht und viele Sicherheitsnormen für die Entsorgung der radioaktiven Stoffe erarbeitet.

Die Genfer Konferenz ermöglichte einen anderen Meilenstein der schweizerischen Leichtwasserreaktoren. Der an der Ausstellung gezeigte Schwimmbadreaktor (Saphir) der USA wurde durch die Reaktor AG, heute PSI (Paul-Scherrer-Institut), käuflich erworben und 1957 als Forschungsreaktor in Betrieb genommen. Durch den Betrieb des Saphir wurden damals die ersten betrieblichen Sicherheitsstandards entwickelt. Es wurden systematische Fahrvorschriften sowie Stör- und Notfallmassnahmen erarbeitet und erprobt. Saphir ist heute noch in Betrieb und dient zur Ausbildung von Operateuren und zur Isotopenproduktion für Industrie, Medizin und Forschung.

Dieser Vergangenheitsbetrachtung wurde bewusst etwas mehr Raum gewidmet, weil in dieser Phase die grundsätzlichen Standards zur Beherrschung der zusätzlichen Nukleargefährdung, der Radioaktivität, die auch in der Natur vorkommt, festgelegt wurden. Die Ausbreitung von radioaktiven Stoffen in die Umwelt im Normal-, Stör- und Unfall ist so eingegrenzt, dass das Schadensausmass begrenzt und wissenschaftlich und gesellschaftspolitisch vertretbar bleibt. Tausende von Wissenschaftlern, Ingenieuren, Technikern und Fachleuten arbeiteten daran, die neue Energieform, die Nuklearspaltung, von der einfachen unmenschlichen Anwendung als Bombe für friedliche Zwecke der Energieproduktion zu entwickeln. Die Sicherheitsstandards, die in dieser Phase entwickelt wurden, sind sehr umfassend.

Die gefühlbetonte Ablehnung der Kernenergie kommt vielleicht daher, dass zu viele nicht wissen, wie die Entwicklung der Vorschriften (Standards) in der freien Welt gelaufen ist.

### Sicherheitsstandards schweizerischer Kernkraftwerke

Die Einwirkungen auf die Anlagen von aussen (u.a. Flugzeugabsturz, Sturm, Erdbeben, Flutwellen) und von innen (u.a. Brand, Komponentenversagen), für welche die Schutzziele zu erreichen sind, bilden die Grundlage für die Systemtechnik und die qualitativen Anforderungen an Gebäude und Komponenten. Je nach sicherheitstechnischer Bedeutung werden die Komponenten

und Gebäude der einschlägigen Sicherheitsklasse zugeordnet. Einige dieser Anforderungen sind standortsspezifisch, andere sind allgemein anzuwenden. An Komponenten anspruchsvoller Sicherheitsklassen werden höhere qualitative Anforderungen gestellt.

Ein Kernkraftwerksbetreiber sucht sich auf dem Markt einen Anbieter, der die obigen Anforderungen erfüllen kann. Ein Lieferant möchte aus verständlichen Gründen von seiner Standardanlage nicht abweichen, es sei denn, dass für die besonderen Anforderungen die Folgen von Kosten und Termine vom zukünftigen Betreiber bezahlt werden. Eine Prototypanlage zu haben, ist aber für den Betreiber und die Behörde eher ungünstig, denn da fehlen die Referenzen zu anderen Anlagen und im späteren Betrieb direkte Vergleiche des Anlageverhaltens. Solche Überlegungen spielen für die kleine Schweiz eine wichtige Rolle, bauen wir doch nicht gerade Kernkraftwerke in Serie wie etwa in Frankreich.

Die ersten kommerziellen Leichtwasser-Kernkraftwerke der Schweiz (Mühleberg und Beznau) wurden im herkömmlichen Teil nach damaligem Sicherheitsstandard der Schweiz gebaut (siehe Tabelle 1). Im Reaktorteil amerikanischer Herkunft wurde als Grundlage der amerikanische Sicherheitsstandard angewendet. Die Anlagen wurden durch die Schweizer Sicherheitsbehörde HSK (Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen), den Betreiber und den Lieferanten auf Erfüllung der Schutzziele hin überprüft. Damals waren die nuklearen Schutzziele bereits formuliert, in der Priorität wie folgt eingestuft:

1. Schutz der Bevölkerung vor radioaktiven Stoffen
2. Schutz des Personals im Werk vor radioaktiven Stoffen
3. Schutz vor Material- und Sachschäden infolge radioaktiver Strahlen.

Dazu kommen noch die Schutzziele von Personen und Sachgütern, die von nichtnuklearen Instanzen geregelt und deren Einhaltung überwacht wird. Es ist Aufgabe des Betreibers, den Behörden zu zeigen, wie die Schutzziele mit den technischen Ausrüstungen und mit dem für die Betriebsphase eingesetzten Personal zu erreichen sind. Die Kriterien, was an Radioaktivität der Bevölkerung, dem Betreiberpersonal und der Umgebung zugemutet werden kann (im Normalbetrieb und bei Störfällen), gilt es bei der Planung zu berücksichtigen. Die Kriterien sind heute noch Gegenstand politischer Auseinandersetzungen. In Fachkreisen der Medizin und Biologie ist der Einfluss der Dosis in bezug auf Radioaktivität so weit be-

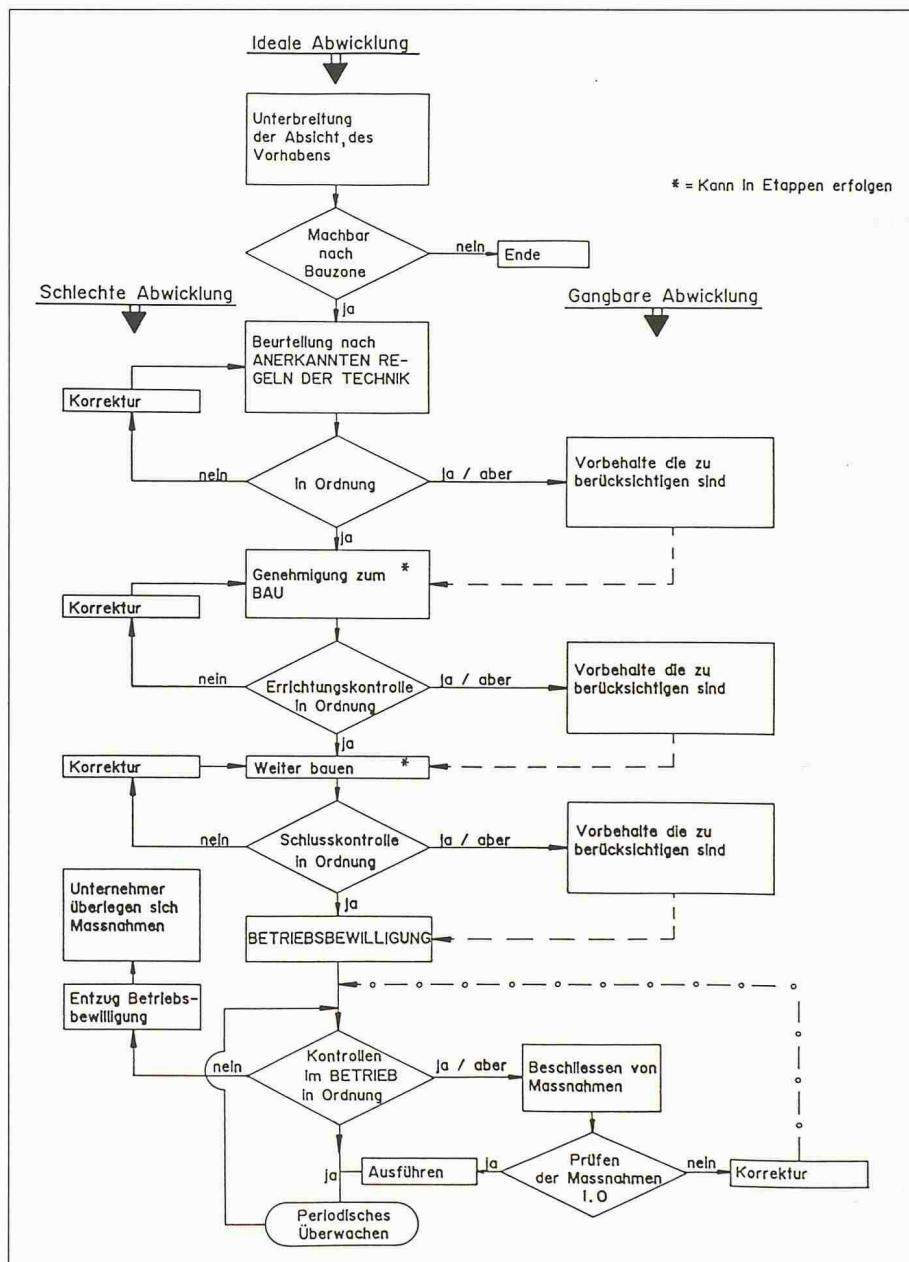


Bild 1. Ablaufschema für die Beurteilung und Kontrolle technischer Einrichtungen

kannt, dass heute die Aussage gemacht werden kann, dass der Mensch mit den gültigen Dosislimiten durch die zusätzliche künstliche Strahlenbelastung keinen merkbaren negativen Einfluss erfährt.

Glücklicherweise dringt bei den Politikern die Einsicht durch, dass weltweit die gleichen Kriterien anzuwenden und durchzusetzen sind. Soweit dem Verfasser bekannt, werden heute auch weniger Tierversuche benötigt, da der Kenntnisstand in bezug auf Bestrahlung sehr gut abgesichert ist.

Heute gibt es 41 HSK-Richtlinien, in denen grundsätzliche Anforderungen an die Kernkraftwerke und Betreiber festgehalten sind. Im mechanischen Bereich bestehen zusätzlich 7 Festlegungen des SVDB - N (Schweizerischer Verein für Druckbehälterüberwachung-Nuklearabteilung). Anhand von

Kontrollen wird die Freigabe zum jeweiligen nächsten Schritt bedingungslos, mit Vorbehalten oder erst nach wesentlicher Korrektur erteilt (Bild 1).

Die Unterschiede gegenüber herkömmlichen thermischen Anlagen sind die folgenden:

1. Bei der Wärmeerzeugung durch Kernspaltung im LWR-Reaktor entstehen radioaktive Spalt- und Aktivierungsprodukte, die als Rückstände zu entsorgen sind.
2. Nach dem Abstellen des Reaktors erzeugt er entsprechend dem Spaltprodukte-Inventar Restwärme, die dann mit dem Zerfall der radioaktiven Isotope ebenfalls abnimmt.

Jede Kontrolle durch die HSK überprüft, ob die Schutzeinrichtungen das Gefährdungspotential gebührend berücksichtigen. Um den Nachweis zu er-

bringen, dass die zwei hauptsächlichen Gefährdungspotentiale zu keiner Verletzung der Schutzziele führten, wurden umfangreiche Versagensmöglichkeiten von Anlageteilen durch sehr ausgiebige Computermodelle berechnet. Das Ziel ist, vor Inbetriebnahme von Kraftwerken die Schwachstellen zu eruieren und durch ingenieurmässige Lösungen auszuscheiden. Die Rechenmodelle, die benutzt werden, um Versagenszenarien zu berechnen, wurden durch Experimente und Erfahrungen früherer technischer Ausrüstungen überprüft. Wie Dr. Hans Fuchs im nächsten Beitrag zeigen wird, wurden vielfältige Risikoberechnungen und -betrachtungen angestellt und die Eintretenswahrscheinlichkeit für hypothetische Störfälle berechnet. Dabei ging es wesentlich darum, bei jeder Eintretenswahrscheinlichkeit auch das Gefährdungspotential zu ermitteln. Diese Werte wurden auch benutzt, um die Versicherungsprämien zu bestimmen. Somit hatten auch die Versicherungen Einfluss auf die in der Schweiz anwendenden Sicherheitsstandards. Die politische Diskussion um die Kernenergie ist zwar nicht Gegenstand dieses Berichtes, kann jedoch nicht ausser acht gelassen werden, weil die Sicherheitsstandards für Kernkraftwerke durch deren Einfluss mitgeprägt wurden.

### **Three Mile Island: Die Forderung nach absoluter Sicherheit**

Nach dem Kernschmelzereignis von Three Mile Island (1979) wurde von den Ingenieuren Bilanz gezogen. Es war im Grunde ein Verlust von investiertem Geld. Die Schutzziele, Schutz der Bevölkerung und des Personals, wurden vollumfänglich erfüllt.

Die damalige Beunruhigung der Medien und der Bevölkerung war auf dem Hintergrund der Angst verständlich. Immer wieder wird von der Nuklearindustrie eine *absolute Sicherheit* verlangt. Solch absolute Anforderungen kann kein Mensch garantieren, auch nicht ein Ingenieur. Umgehend wurde der TMI-Störfall beurteilt. Anhand des Schadensausmasses zog man Schlüsse und Lehren bezüglich anderer Leichtwasserreaktoren. In dieses Verfahren wurden auch die schweizerischen Sicherheitsstandards miteinbezogen. In den Grundzielen waren keine Änderungen nötig, jedoch wurde eine weitergehende Beurteilung von Schadensszenarien durch Betreiber und Projektanten verlangt. Schnelle Antworten waren nicht möglich, bis der effektive Störfallablauf mit seinen Konsequenzen erfasst war. Es wurden nichtsdesto-

weniger neue Anforderungen und Fragen an die Adresse der Aufsichtsinstanzen und Betreiber gestellt.

Die Ergebnisse wurden laufend überprüft und mit den CH-Sicherheitsstandards verglichen, um nicht unnötige, ja sogar kontraproduktive Massnahmen in bestehenden oder im Bau befindlichen Kernkraftwerken einzuleiten. Nachrüstungen im Sinne von einzubauenden Systemen und Einüben von Ge genmassnahmen für Störfälle von sehr kleiner Eintretenswahrscheinlichkeit wurden als «anerkannter Stand der nu klearen Technologie» eingeleitet.

Nach TMI entbrannte die Diskussion «Was heisst sicher genug?», welche sehr lange auf eher emotionaler und subjektiver Ebene geführt wurde. Viele im Schnellverfahren sich selbst ernannte Pseudoexperten beherrschten die Szene.

In dieser Phase wurden die Sicherheitsbetrachtungen aber unabirrt weitergeführt und die Sicherheitsstandards unter Berücksichtigung der neuen Erkenntnisse nochmals überprüft. Weitere Störfallszenarien wurden analysiert und gezielt Experimente zur Überprüfung der Randbedingungen ausgeführt. Dadurch wurde es möglich, den Zuverlässigkeitgrad der Aussagen immer genauer zu erhärten und die Erkenntnisse zu festigen. Die Fachwelt hat öfters versucht, die Medien in diesen Prozess einzubeziehen, denn es war für viele, die nicht direkt am Geschehen beteiligt waren, schwierig, die Arbeit abzuschätzen, die bezüglich Sicherheitserhöhungen und Qualitätserhöhung geleistet wurde. Trotzdem wurde die Beunruhigung der Bevölkerung von Betreiberkreisen 1982 ernsthaft aufgenommen.

Anfang 1983 wurde eine Arbeitsgruppe gegründet, die sich während dreier Jahre um die Qualitätssicherung und die Sicherheitsstandards von Kernkraftwerken bemühte. Dieses umfangreiche Werk heisst «Projektabwicklung und Qualitätssicherung bei Kernkraftwerken» (PQS), eine schweizerische Studie unter der Mitwirkung von Kernkraftwerksbetreibern, Kernkraftwerkslieferanten, Ingenieurunternehmen und Nuklearbehörden. Die Ausgabe datiert auf Januar 1986. Im Bericht wurden die Erfahrungen der schweizerischen Kernkraftwerke Mühleberg, Beznau, Gösgen und Leibstadt ausgiebig in Be tracht gezogen. In den Schlussfolgerungen wurde der Sicherheitsstandard für das nächste Kernkraftwerk in der Schweiz definiert. Wie der Leser erkennen kann, waren diese Sicherheitsstandards überprüfungen vor Tschernobyl durchgeführt worden. Die genannte Überprüfung umfasst die Thematik «Sicherheitsrelevanz, Gefährdung und

Zumutbarkeit» sehr systematisch und in den Abhängigkeiten zueinander.

Die Anstrengungen, ethisch und moralisch vertretbare Sicherheitsstandards zu formulieren und den potentiellen Gefahren entsprechende Anlagen zu bauen und zu betreiben, sind in der freien Welt unvermindert gross. Die HSK und auch die Betreiber führen einen ausgiebigen internationalen Erfahrungsaustausch.

### **Tschernobyl und die Sicherheitsdiskussion**

Bezüglich Reaktorunfall in Tschernobyl wäre festzuhalten: Das politische System der Sowjetunion liess eine Überprüfung der Sicherheitsstandards und der Qualität der Komponenten und Systemtechnik der Kernkraftwerke durch den Westen in der Vergangenheit nicht zu. Störfälle und Unfälle wurden häufig verschwiegen. Höchstens grüchteweise drangen Informationen zu uns. Die nicht mehr verschweigbare Katastrophe in Tschernobyl öffnete für den Ostblock ungewollt die Türen. Was zum Vorschein kam, war gravierend: Mängel an Qualität, Vernachlässi gungen in der Ausbildung, Bürokratie. Das im Bild 1 dargestellte Verfahren hätte für eine Tschernobylanlage in der Schweiz nie zu einer Betriebsbewilligung geführt, weil keines der drei Hauptschutzziele erreicht war.

Der Lerngewinn bezüglich des Schweizer Sicherheitsstandards aus Tschernobyl ist unwesentlich. Inwieweit die Politiker diese Aussagen der Fachwelt an hören und akzeptieren, wird Gegenstand weiterer konsenssuchender Dialoge sein. Technische Sicherheit lässt sich nur mit technischen Mitteln gewährleisten. Der Mensch ist dabei Vermittler zur Technik. Lernen kann man aus den Erfahrungen anderer, aus Fehlern oder guten Ergebnissen. So wurde der Erfahrungsaustausch zwischen den Betreibern weltweit unter Einbezug der Ostblockstaaten in die Wege geleitet. Diese Selbstüberprüfung erlaubt es, die Sicherheitsstandards dort, wo aus Erfahrung nötig, zu verbessern und dadurch die Eintretenswahrscheinlichkeit von Störungen zu vermindern. Diese Methodik ist in dieser weltweiten Anwendung neu, und als Verfügbarkeits ingenieur hoffe ich, dass andere Industrien nachziehen werden.

### **Entwicklungspotential der Leichtwasserreaktoren**

Das Ziel eines jeden Betreibers ist es, ein Kraftwerk mit seinen Mitarbeitern

so zu betreiben, dass die Sicherheit gewährleistet ist und dass der Versorgungsauftrag zur Zufriedenheit der Kunden erfüllt werden kann. Die in den neuesten Kernkraftwerken der Leichtwasser-Baureihe angewendeten Sicherheitsstandards sind auch das Ergebnis ständiger Überprüfung anhand der Betriebserfahrungen. Wie in Bild 1 dargestellt, werden die Kernkraftwerke in der Betriebsphase von den Betreibern laufend kontrolliert. Auch die Behörden richten ein wachsames Auge auf die Betreiber und die Anlagen.

Gründe für die kontinuierliche Bewertung des Sicherheitsstandards sind vielfältig:

- Höheres Sicherheits- und Schutzgefühl für die Bevölkerung.
- Besserer Schutz für das Betriebspersonal (wenig Strahlenbelastung, optimale Arbeitsbedingungen, Brandschutz, Wärmeschutz, Absturzschutz).
- Bessere Überprüfbarkeit und Wartbarkeit der Sicherheitsausrüstungen bei produzierender Anlage.

Ein Entwicklungspotential der LWR ist heute noch beschränkt vorhanden und eher in der technischen Vereinfachung der Anlagen und optimaleren Wissensübermittlung vom Lieferanten zum Betreiber zu suchen. Um dies zu verstehen, soll die folgende Definition eingeführt werden.

$$\text{Verfügbarkeit } (t) = f(\text{Zuverlässigkeit, Wartbarkeit})[4]$$

Was die technische Sicherheit anbelangt, gilt diese Formel für die elektromechanischen Sicherheitssysteme.

Was die Energieproduktion anbelangt, gilt diese Formel für die dazu benötigten elektromechanischen Arbeitssysteme.

Der heutige Sicherheitsstand widerspiegelt sich in der Qualität der Anlagen-technik. Betreibt nun ein Betreiber die Anlage nach den Absichten des Lieferanten, so ist die anfängliche Verfügbarkeit der Anlage hoch. Damit die Anlage auch auf die Dauer gut und sicher betrieben werden kann, muss sie gepflegt, d.h. gewartet werden. Anhand der erwirtschafteten Verfügbarkeiten und anderer hier nicht definierten Qualitätsfaktoren kann die tatsächliche Sicherheit auch nachgewiesen und überprüft werden.

Durch das möglicherweise auch in der Schweiz zur Anwendung gelangende Lastfolgefahren werden die Anlageteile häufiger thermischen und mechanischen Belastungszyklen ausgesetzt, was zu früheren Ermüdungen der technischen Ausrüstung führt. In der Praxis heißt dies:

- Bundesgesetz über die friedliche Verwendung der Atomenergie und den Strahlenschutz
  - Eidg. Verordnung über den Strahlenschutz
  - Eidg. Verordnung über Begriffsbestimmungen und Bewilligungen im Gebiet der Atomenergie
  - Eidg. Verordnung betreffend die Eidg. Kommission für die Sicherheit der Atomanlagen
  - Schweiz. Zivilgesetzbuch
  - Schweiz. Obligationenrecht
  - Bundesgesetz über die Arbeit in Industrie, Gewerbe und Handel
  - Bundesgesetz betreffend die elektrischen Schwach- und Starkstromanlagen (Elektrizitätsgesetz)
  - Eidg. Verordnung über die Erstellung, den Betrieb und den Unterhalt elektrischer Schwachstromanlagen
  - Eidg. Verordnung über die Erstellung, den Betrieb und den Unterhalt von elektrischen Starkstromanlagen
  - Eidg. Verordnung über die Vorlage für elektr. Starkstromanlagen
  - Eidg. Erlasse über elektrische Anlagen
  - Eidg. Verordnung betr. Aufstellung und Betrieb von Dampfkesseln und Dampfgefäßen
  - Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer gegen Verunreinigung mit Vollziehungsverordnung
  - Bundesgesetz über die Kranken- und Unfallversicherung
  - Bundesgesetz über den Strassenverkehr
  - Baugesetz des Kantons... mit Vollziehungsverordnung
  - Gesetz über die Nutzung und den Schutz der öffentlichen Gewässer des Kantons...
  - Kantonale Verordnung über die Feuerpolizei
  - Kantonale Polizeivorschriften
  - Schweiz. Unfallversicherungsanstalt (SUVA)
  - Eidg. und kantonale Fabrikinspektorate
  - Schweiz. Verein von Dampfkesselbesitzern (SVDB)
  - Schweiz. Elektrotechnischer Verein (SEV)
  - Schweiz. Ingenieur- und Architektenverein (SIA)
  - Verein Schweiz. Maschinenindustrieller (VSM)
- Ausländische Körperschaften, deren Vorschriften und Normen neben den schweizerischen in Frage kommen:
- ASME American Society of Mechanical Engineers Boiler and Pressure Vessel Code
  - TEMA Tubular Exchangers Manufacturers Association
  - IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineer, Technische Richtlinien
  - DIN Deutsche Industrie-Normen
  - VDE Verband Deutscher Elektrotechniker
  - AD Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter
  - VGB Verein Grosskessel-Besitzer
  - VDEW Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke
  - VDI Verein Deutscher Ingenieure
  - IEC International Electrical Commission
  - KTA Kern-Technische Anlagen, Regeln der BRD
  - CFR Code of Federal Regulations der USA

Tabelle 1. Gesetze, Verordnungen, Erlasse, Vorschriften, Normen für den Bau eines Kernkraftwerkes in der Schweiz

- Elemente einsetzen, die solche Zyklen aushalten.
- Vorkehrungen treffen, dass die Wartung rasch, sicher und mit wenig Strahlenbelastung durchgeführt werden kann; dies möglichst bei produzierender Anlage.

Der gegenwärtige Sicherheitsstandard verlangt mehrfache Absicherungen (Redundanzen) in Sicherheitssystemen und mehrfache Barrieren. Betrachten wir die Sicherheit mit Hilfe der Verfügbarkeitsformel als zeitabhängige Größe, so heißt dies, dass zu jedem Zeitpunkt eine ausreichende Zahl von Sicherheitssystemen zur Verfügung stehen muss. Sicherheitsausrüstungen können automatisch oder durch das Kraftwerkspersonal ausgelöst werden. Das Auslösungs-Kriterium ist durch die Dringlichkeit der Sicherheitsmaßnahme gegeben.

Wo steht der Mensch bezüglich Sicherheitsstandard? Einfach ausgedrückt liesse sich sagen: Wenn der Mensch zum Risiko für die Maschine wird, dann ist etwas falsch. Am Beispiel des

Autos lässt sich die Aussage verdeutlichen: Der Fahrer parkt abends vorwärts in die Garage, am Morgen sitzt er halb verschlafen in den Wagen, will zur Arbeit hetzen, legt den ersten Gang ein, gibt Vollgas, und es kracht. Ein Fehler (Irrtum), und die Front ist kaputt, «Opfer» ist die Maschine. Für die Folgen seines Missgeschicks bezahlt möglicherweise zum Teil die Versicherung.

Ein Kernkraftwerk besteht nicht nur aus einem Element, sondern aus verschiedenen unabhängigen Sicherheitssystemen, die alle denselben Schutzzwecken dienen: Den Reaktorkern zu kühlen, damit die nukleare Gefährdung, das Ausfließen von gefährlichen Mengen radioaktiver Stoffe, verhindert wird. Wie aufgeführt, starten die Sicherheitsausrüstungen automatisch auf physikalische Prozessgrößen wie Druck, Temperatur, Massendurchfluss, Strahlennmessung, oder auch angeregt durch die diensthabende Mannschaft. Einer allein kann kein Kernkraftwerk betreiben, es handelt sich um Teamar-

**Literatur**

- [1] Franck, E.: Risikoanalysen von der Planung bis zum Betrieb. «Maschinenschaden», Heft 3/1988, S. 97–105
- [2] Häusermann, R.: Störung, Unfall, Katastrophen. «OUTPUT», Heft Nr. 11/1987, S. 5–6
- [3] De Senarcens, M.: Sicherheit im Kernkraftwerk. «Schweizerische Arbeitgeber-Zeitung» 14, 3. April 1986, S. 240–241
- [4] Kececioglu, D.: Maintainability Engineering. The George Washington University, Tucson, Arizona 1979

beit mit gegenseitiger Überwachung. Erst dadurch ist die Anlagensicherheit gewährleistet. Im Sinn des «Human Engineering» ist berücksichtigt, dass die Sicherheitsstandards so angesetzt sind, dass eine Fehlhandlung oder Sabotage von einzelnen die übergeordneten Schutzziele nicht in Frage stellen.

Die Lehre aus Three Mile Island für Betreiber: Heute steht fest, dass die mangelnde Vertrautheit (Ausbildung) der Mannschaft und des Managements mit dem Anlageverhalten die Grundursache für das Kernschmelzen war. Die passiven Schutzmassnahmen und die Umhüllung des Reaktorgefäßes nach damaligem Sicherheitsstandard genügten dagegen. Die Anlage musste «abgeschrieben» werden. Die Erfahrung, die aus diesem ungewollten «Experiment»

gewonnen wurde, hat die nachfolgenden Sicherheitsstandards im «Führen» von Kernkraftwerken beeinflusst.

**Ausblick**

Die Grundausstattung eines Kernkraftwerks mit Leichtwasserreaktor ist heute ausgereift. Sie stellt den Stand höherer Ingenieurkunst dar. Wir sprechen nicht gerne von «High-Tech» in den Kernkraftwerken, wir haben sie schon [2, 3]. Punktuelle technische Verbesserungen sind wohl denkbar, aber nur nach reiflicher Überlegung und Abwägung auf die Auswirkung der gesamten Sicherheit; denn nicht alles, was vordergründig (spontan) als Verbesserung erscheint, ist tatsächlich eine. Zur Erreichung der gewünschten Sicherheit ist der Einzel-Mensch wohl das schwächste Glied. Das Team aber ist stark genug, um die heutigen LWR sicher zu meistern und beides zu erreichen: Sicherheit und Energieproduktion. Persönlich wünsche ich mir für die Schweiz, dass die «Konsumenten» von Sicherheit, Vergnügen, Nahrung, Freiheit usw. auch an den aufopfernden Einsatz der Ingenieure denken, wenn sie einerseits die technischen Einrichtungen kritisieren und anderseits davon profitieren.

Als Ingenieure und Fachleute müssen wir uns täglich den Gesetzmäßigkeiten

der Natur unterwerfen. Die heutigen Sicherheitsstandards berücksichtigen diese Gesetzmäßigkeiten, soweit sie heute erfasst und erforscht sind. Die Sicherheitsstandards und die Kernkraftwerke sind evolutionäre «Schöpfungen», um die Kernspaltung für friedliche Zwecke zu nutzen. Als Mensch und auch als Ingenieure bleibt es unsere Verantwortung, den Missbrauch zu verhindern und die Bevölkerung darüber aufzuklären. Vergessen wir dabei aber nicht: Die Technik hat die Tücke, dass der Glaube allein nicht genügt, sondern das Können, mit ihr umzugehen, im Glauben an die Schöpfung.

Als Ingenieur möchte ich abschliessend dazu aufrufen, dass andere Industrien ihre Sicherheitsstandards unter Einbezug der Schadstoffe und Risiken überprüfen und wo nötig anpassen. In einigen Gebieten gäbe es mit wenig Kostenaufwand eine qualitative Verbesserung, vorausgesetzt die Investitionen werden wirklich getätigt, statt in Form von hohen Versicherungsprämien das Gefühl der Unsicherheit zu befriedigen. Es ist ja ein durchwegs gangbarer Weg, beides mit Vernunft zu tun [1].

Adresse des Verfassers: Rudolf Häusermann, dipl. Ing. ETH, Kernkraftwerk Leibstadt AG, 4353 Leibstadt.

**Fortschrittliche Kernreaktoren****Sicherheit von Kernreaktoren zur Energieerzeugung – Rückblick und Ausblick**

**Die grundsätzlichen Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke ergeben sich einerseits aus der grossen Energiemenge, die bei der Kernspaltung frei wird, und anderseits aus der Radioaktivität der Spaltprodukte. Vorausschauende Sicherheitsmaßnahmen haben trotz anfänglicher Reaktortypenvielfalt und Lerneffekten zu einer – trotz Tschernobyl – sehr guten Sicherheitsbilanz geführt. Darauf beruhend laufen Entwicklungen, die der aus Gründen der Umwelt- und Ressourcenschönung erwünschten stärkeren Rolle der Kernenergie entgegenkommen.**

**Kernreaktoren: grundlegende Vorgänge und Sicherheitsanforderungen [1-3]****Kernspaltung**

In einem Kernreaktor wird Energie hauptsächlich aus der Spaltung des

Uran-Isotops 235 gewonnen. Aus dem Uran entstehen Bruchstückpaare wie

VON HANS FUCHS,  
BADEN

z.B. ein Krypton- und ein Barium-Isotop oder ein Brom- und ein Lanthan-

Isotop. Die Bruchstücke (Spaltprodukte) enthalten den überwiegenden Teil der freiwerdenden Energie; sie werden auf kürzester Entfernung abgebremst und erwärmen das umgebende Uran (den «Brennstoff»). Die Wärme wird vom Kühlmittel abgeführt und in einer Dampfturbine in mechanische Energie und dann Elektrizität umgewandelt.

**Kettenreaktion**

Neben den Spaltprodukten entstehen bei jeder Spaltung zwei bis drei Neutronen, die eine hohe Geschwindigkeit aufweisen und deshalb nur selten weitere Spaltungen verursachen. Werden diese schnellen Neutronen in einem Moderator abgebremst, so können sie – als nunmehr «thermische» Neutronen – mit grösserer Wahrscheinlichkeit weitere Spaltungen von Uran 235 auslösen. In einem Gebilde mit der richtigen Zusammensetzung von Uran-Brennstoff, Moderator und Kühlmittel kann damit