1 Einleitung

Der zukünftige weltweite Primärenergieverbrauch ist aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren mit einer relativ großen Unsicherheit behaftet, jedoch kann eine Verdopplung innerhalb der nächsten 30 bis 40 Jahren als realistisch betrachtet werden [1]. Die Hauptgründe für diesen Anstieg sind zum einen in der sich beschleunigenden Industrialisierung der Entwicklungs- und Schwellenländer und zum anderen in der steigenden Weltbevölkerung zu sehen.
Da aber schon in der heutigen Zeit die Auswirkungen der anthropogenen CO_2-Emissionen deutlich werden, kann der zusätzliche Energiebedarf trotz stetiger Verbesserungen der Anlagentechnik nicht alleine durch fossile Energieträger gedeckt werden. Obwohl regenerative Quellen eine ökologisch sinnvolle Ergänzung der Energieerzeugungstechniken sind, verfügen sie noch nicht über die erforderliche Leistungsfähigkeit, den Energiebedarf in dem benötigten Maße unter ökonomisch vertretbaren Bedingungen bereitzustellen. Die Kernenergie bleibt von dem Leistungspotenzial her eine Option für eine zukünftige CO_2-freie beziehungsweise -arme Energiebereitstellung. Allerdings wird dazu nur die Kernspaltung als Alternative im relevanten Zeitrahmen zur Verfügung stehen. Neuere Kernenergiesysteme wie die Kernfusion oder die beschleunigergetriebenen Systeme (Accelerator Driven Systems, ADS) werden in den nächsten Jahrzehnten noch nicht im großtechnischen Maßstab realisiert werden können.
Dementsprechend erwartet die Weltenergiekonferenz bis zum Jahre 2020 eine Verdopplung der Energieerzeugung durch Kernenergieanlagen, jedoch sind für den weiteren Ausbau höhere und vor allem international einheitliche Sicherheitsstandards erforderlich, um die zukünftige Kerntechnik wieder für die Gesellschaft akzeptabel zu machen. Katastrophale Reaktorunfälle, wie der von Tschernobyl (1986), müssen ausgeschlossen werden. Des Weiteren müssen insbesondere die langlebigen Spaltisotope sicher und langfristig von der Biosphäre isoliert und eine Proliferation verhindert werden.
Technischen Lösungen, die die Folgen eines Störfalles auf das Reaktorschutzgebäude beschränken und radiologische Belastungen der Umwelt verhindern sollen, werden derzeit weltweit intensiv erforscht und sind teilweise schon realisiert.
In der Forschung werden im Wesentlichen zwei Lösungsansätze verfolgt: Evolu-

tionäre und revolutionäre Reaktorkonzepte. Der erste Ansatz zielt darauf ab, die Kernschmelzwahrscheinlichkeit zu verringern und die Folgen eines katastrophalen Versagens der Sicherheitseinrichtungen auf die Anlage selbst zu beschränken. Das heißt, dass die während eines Störfalles eventuell frei werdenden radioaktiven oder toxischen Stoffe innerhalb des Containments zurückgehalten werden sollen und dadurch eine Gefährdung der Umwelt verhindert wird. Während diese evolutionären Konzepte auf der Weiterentwicklung bestehender Systeme basieren, soll bei revolutionären Konzepten ein Schmelzen des Reaktorcores naturgesetzlich ausgeschlossen werden. Wesentliche Neuerung ist hierbei, dass im Störfall der Rückhalt der Spaltprodukte innerhalb der Anlage auch ohne den Einsatz von aktiven Sicherheitseinrichtungen gewährleistet werden kann.
Im Rahmen dieser Arbeit wird ein innovatives Brennelement für einen Druckwasserreaktor mit deutlich verbesserten Sicherheitsmerkmalen vorgestellt. Wesentlicher Unterschied zu konventionellen Brennelementen ist die Verwendung von drucklos gesintertem Siliziumcarbid (SSiC) als Strukturwerkstoff zur Kapselung der UO_2-Brennstoffpellets innerhalb der Brennstäbe und der Einsatz von Bleigranulat zur Nachwärmeabfuhr des Reaktorcores während eines Störfalls. Diese keramische Spaltproduktbarriere verringert die primärseitige Kontamination des Kühlkreislaufes und verhindert bei einem katastrophalen Störfall eine Freisetzung des nuklearen Inventars. Des Weiteren verbessert sie als sehr korrosionsbeständige und mechanisch belastbare Barriere die Spaltproduktrückhaltung während der Zwischen- und Endlagerung. Zur Realisierung der Umhüllung der Brennstoffpellets mit Formteilen aus SSiC wird die bei Henkel [2] vorgestellte Hochtemperaturfügetechnik einer detaillierten Parametervariation unterzogen und auf Basis der erzielten Ergebnisse optimiert. Wesentlicher Vorteil dieser Technik ist die Verwendung artgleicher Zusatzwerkstoffe für den Fügeprozess, wodurch ein homogener Werkstoffverbund erzielt wird. Das bedeutet, dass die Fügezone nahezu dasselbe Eigenschaftsprofil wie der Grundwerkstoff SSiC aufweist und somit Einschränkungen der mechanischen und chemischen Stabilität des Verbundes in diesem Bereich minimiert werden.
Zur Beurteilung des mechanischen Langzeitverhaltens wird ein Teil der Proben mehrere Monate einer Strahlungsdosis exponiert, die von der Intensität und dem Spektrum her den typischen Bedingungen eines herkömmlichen Druckwasserreaktors entspricht, und anschließend 4-Punkt-Biegeversuchen und gravimetrischen Dichtigkeitsuntersuchungen unterzogen. Weiterhin werden mit den gefügten SSiC-Kapseln Korrosionstests in Bleischmelzen durchgeführt, um Aussagen bezüglich ihres Materialverhaltens unter Störfallbedingungen zu treffen. Neben diesen Untersuchungen zur chemischen Stabilität der SSiC-Kapseln werden sowohl für den Normalbetrieb als auch für den Störfall thermomechanische FEM-Berech-

nungen für das Brennelementkonzept mit verschiedenen Hüllrohrmaterialien durchgeführt.
Den Abschluss dieser Arbeit bildet die Bewertung des innovativen Brennelementkonzeptes im Vergleich zu den herkömmlichen technischen Systemen.

2 Entwicklungstendenzen der Kernenergie

2.1 Entwicklung der Weltenergiewirtschaft und ihre Herausforderungen

Die Frage nach der weiteren Entwicklung der friedlichen Nutzung der Kernenergie ist eng mit dem zukünftigen Weltenergieverbrauch und den daraus resultierenden CO_2-Emissionen verknüpft.
Der weltweite Energieverbrauch befindet sich aufgrund der differierenden Versorgungslage je nach Region auf einem sehr unterschiedlichen Niveau. In Abbildung 2.1 ist zu erkennen, dass der durchschnittliche Pro-Kopf-Verbrauch in den höher industrialisierten Nationen zwischen 4 tSKE/(Person*a) [Europa und ehemalige Sowjetunion] und 12 tSKE/(Person*a) [z.B. Singapur] liegt, wohingegen der Verbrauch in den Ländern der Zweiten und Dritten Welt deutlich geringer ist.

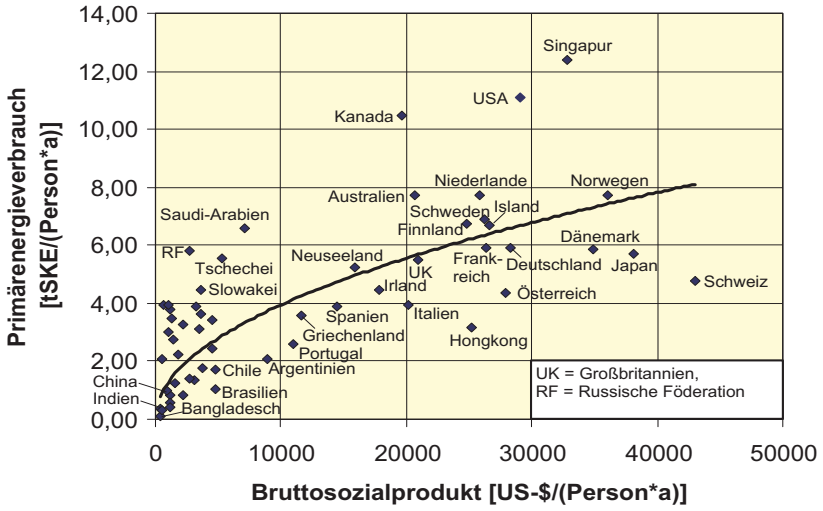

Abb. 2.1 Primärenergieverbrauch im Verhältnis zum Bruttosozialprodukt 1997 [3], [4]

Vergleicht man diesen Pro-Kopf-Verbrauch mit dem spezifischen Bruttosozialprodukt als Maß für den Lebensstandard und die industrielle Produktivität, wird deutlich, dass die Bereitstellung ausreichender Mengen an Energie - speziell elektrischer Energie - die Voraussetzung für die Entwicklung und den Wohlstand eines Landes ist.
Die zentrale Aufgabe der Weltenergiewirtschaft der nächsten Jahre wird die Versorgung der bevölkerungsreichen Schwellen- und Entwicklungsländer mit elektrischer Energie sein. Bisher entfielen ca. 60% des Primärenergieverbrauches auf die Industrieländer und die Staaten der ehemaligen Sowjetunion und lediglich 40% auf die Entwicklungsländer. Dieses Verhältnis wird sich in den nächsten Jahrzehnten drastisch ändern. Von dem in den nächsten 50 Jahren prognostizierten Wachstum der Weltbevölkerung um 4 Mrd. auf ca. 10 Mrd. Menschen wird der mit Abstand größte Anteil auf die Entwicklungsländer entfallen (s. Abbildung 2.2).

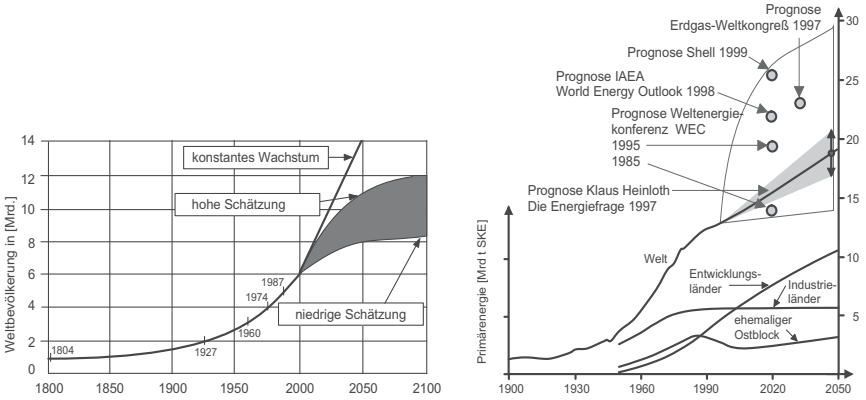

Abb. 2.2 Entwicklung der Weltbevölkerung und des Primärenergieverbrauches [1], [5]

Wegen dieses Bevölkerungswachstums und des Überganges der Entwicklungs- und Schwellenländern zu Industrieländern und der einhergehenden gesteigerten Produktivität der Wirtschaft ist bis dahin mit einem weltweiten Primärenergieverbrauch von ca. 20 Mrd. tSKE zu rechnen, der nur durch zusätzliche, zumeist fossilen Kapazitäten für die Energieversorgung zu decken ist.
Ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt der zukünftigen Energiepolitik ist die Reduktion klimaschädigender Treibhausgase. 1992 wurde die Klimarahmenkonvention in Rio de Janeiro verabschiedet und seither von 186 Staaten ratifiziert [6].

In ihr wurde eine Stabilisierung der Konzentration der Treibhausgase auf einem nach dem heutigen Kenntnisstand tolerablen Niveau beschlossen. In dem Klimaprotokoll von Kyoto [7] folgte die rechtsverbindliche Festlegung der Reduktionsziele. Demnach müssen die Industriestaaten ihre CO_2-Emissionen bis spätestens zum Jahre 2012 um 5,2% gegenüber dem Stand von 1990 vermindern.
Um diese Ziele zu erfüllen, ist eine Veränderung der derzeitigen Energieversorgung nötig. Verbesserungen im Bereich der Energieumwandlung und Nutzung der vorhandenen Einsparpotenziale sind zwar sinnvolle Maßnahmen zur Emissionsminderung, diese allein werden jedoch nicht ausreichen. In Zukunft muss der Anteil der fossilen Energieträger, die 80% zur Weltenergieversorgung beitragen, deutlich reduziert werden und verstärkt CO_2-freie Energiequellen genutzt werden. Neben den regenerativen Techniken ist hier vor allem die Kernenergie eine Option, und zwar unter der Voraussetzung, dass die derzeit bestehenden Risiken dieser Technik vermieden werden.

2.2 Heutiger Stand der Kernenergie

Die nukleare Stromerzeugung begann Anfang der 50er Jahren in den USA mit der Versuchsanlage EBR-I. Fünf Jahre später ging mit der Anlage Calder Hall, die auch heute noch in Betrieb ist, weltweit der erste kommerzielle Reaktor an das öffentliche Netz. In Deutschland erfolgte dieser Schritt mit den Kernkraftwerken Rheinsberg/Brandenburg und Obrigheim/Baden-Württemberg 1966 bzw. 1968.

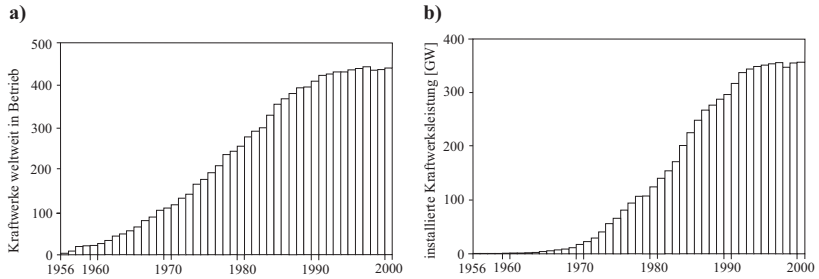

Abb. 2.3 **a) Entwicklung der weltweit kommerziell betriebenen Kernkraftwerke**
b) Weltweit kommerziell zur Verfügung stehenden Brutto-Kraftwerksleistung [8]

Es folgte eine starke Aufschwungphase der Kernenergie, die bis in die 80er Jahre hineinreichte (s. Abbildung 2.3). Durch die Bereitstellung leistungsstarker Reak-

toren Anfang der 70er Jahre wie z.B. Biblis A (1973), die eine ökonomisch konkurrenzfähige Stromerzeugung ermöglichten, und unter dem Eindruck der Ölpreiskrisen wurden große Kapazitäten - im Mittel Anlagen mit einer Leistung von 1000 MW_{el} - geordert, die vielfach erst in den 80er Jahren fertiggestellt wurden. Seit den Unfällen in Three Mile Island (1979) und Tschernobyl (1986) ist die Akzeptanz der Kernenergie in weiten Bevölkerungskreisen stark gesunken und der weitere Ausbau der Kraftwerkskapazitäten weitgehend ins Stocken geraten. Aus Angst vor den radiologischen Folgen von Reaktorunfällen hat sich weltweit ein starker Widerstand gegen diese Form der Energieerzeugung formiert, der in mehreren Staaten, als jüngstes Beispiel ist hier Deutschland zu nennen, zu Ausstiegsbeschlüssen aus der Kernkraft geführt hat. Es ist zu erwarten, dass sich die Gesamtzahl der weltweiten Kernkraftwerke auch in den nächsten Jahren nicht wesentlich ändern wird. Der Zubau neuer Anlagen (Stand 08/2006: 28 Anlagen, P_{el}: 220 GW_{el}) - konkrete Pläne für die nähere Zukunft haben derzeit Japan, Korea, China, Taiwan, Frankreich, Finnland und einige osteuropäische Länder - wird weitgehend durch die Abschaltung unrentabler und überalterter Anlagen kompensiert werden.

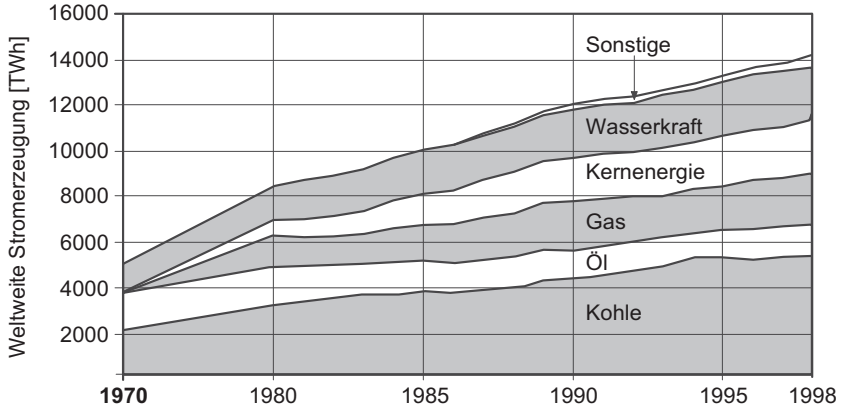

Abb. 2.4 Bruttostromerzeugung weltweit [9]

Mitte 2006 waren 442 Kernkraftwerke mit einer Gesamt-Nettoleistung von 370 GW_{el} in Betrieb. Sie stellten mit 2.626 TWh ca. 16% der weltweiten Stromerzeugung bereit [8]. Dabei ist die Bedeutung der Kernenergie für die 31 Länder, die Kernkraftwerke besitzen, unterschiedlich hoch. Während der Anteil der nuklearen Stromerzeugung in den westlichen Industrienationen und einigen Staaten

der ehemaligen GUS auf einem hohen Niveau verharren wird - er reicht von 17% in Russland bis 77% in Frankreich bzw. 69% in Litauen - ist ein weiterer Ausbau in einigen Ländern mit derzeit geringem Kernkraftanteil geplant. Beispielsweise ist in China die Fertigstellung von 8 Anlagen innerhalb der nächsten 10 Jahre geplant, die die bestehenden Kapazitäten von ca. 2.200 MW_{el} vervierfachen werden.

2.3 Anforderungen an die zukünftige Kernenergienutzung

Eine zentrale Anforderung an die Sicherheitskonzeption von Kernreaktoren ist die Gewährleistung der Nachwärmeabfuhr. Nach dem Abschalten des Reaktors finden weiterhin β^-- und γ^--Zerfälle der Spaltprodukte in den Brennelementen statt, die in Form von Wärmeenergie zu einer erheblichen Nachzerfallsleistung des Reaktors führen.[1]

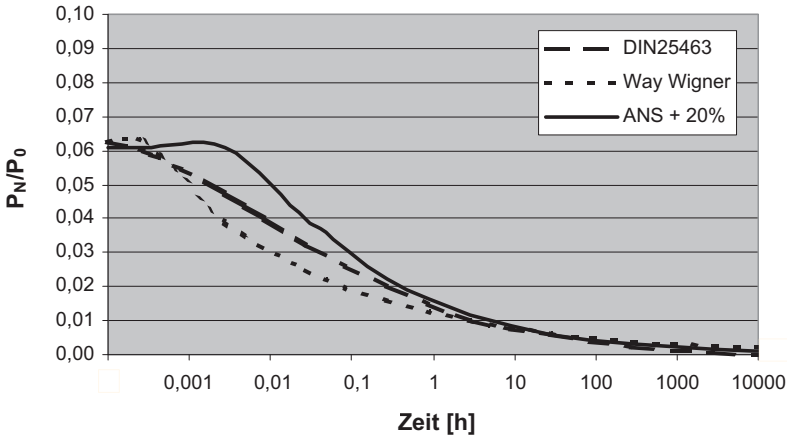

Abb. 2.5 Nachwärmeproduktion eines Reaktors

In Abbildung 2.5 ist der zeitliche Verlauf der nach drei verschiedenen Methoden berechneten Nachwärmeleistung relativ zur Nominalleistung eines Reaktors dargestellt. Unmittelbar nach dem Abschalten fallen ca. 6% und nach 10 Stunden

[1] Diese Nachwärmeproduktion bleibt für alle Zeiten erhalten, allerdings mit exponentiell abnehmender Tendenz. Sie muss also auch bei den Sicherheitsfragen bzgl. der Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Stoffe berücksichtigt werden.

noch ca. 0,5% der Nominalleistung als Nachwärme an. Für einen konventionellen Druckwasserreaktor mit P_{th} = 3800 MW bedeutet dies, dass direkt nach der Beendigung der nuklearen Kettenreaktion noch ca. 230 MW Nachwärme produziert wird.
Ohne eine ausreichende Nachwärmeabfuhr würde ein Kernschmelzunfall stattfinden, der im Folgenden kurz skizziert wird:
Durch das Fehlen einer äußeren Wärmesenke heizt sich der Kern zunächst auf und das Wasser im Reaktordruckbehälter (RDB) beginnt zu verdampfen. Das gesamte System heizt sich auf, wobei ab ca. 950°C die exotherme Zirkonium-Wasser-Reaktion einsetzt, die zusätzlich zu einer Wärmefreisetzung führt, und Teile der Corestrukturen beginnen zu schmelzen. Die Brennstäbe platzen infolge des erhöhten, temperaturbedingten Innendrucks, und die Spaltgase werden in den RDB freigesetzt. Bei heutigen Druck- und Siedewasserreaktoren würden nach ca. 1 Stunde die Temperaturen in Teilbereichen des Reaktorcores auf ca. 2850°C ansteigen. Nach 1,5 Stunden ist das Core zusammengeschmolzen und in die Bodenkalotte des Reaktordruckbehälters gefallen, wo das Corium einen Schmelzesee bildet. Im weiteren Verlauf schmilzt der RDB und das Containment wird stark geschädigt. Dies kann durch die eintretende Druckerhöhung, Dampf- und Wasserstoffexplosionen oder infolge des Durchschmelzens des Coriums durch das Bodenfundament geschehen, wodurch große Mengen an radioaktiven Spaltprodukten in die Umwelt gelangen. Die Folgen eines derartigen Unfalles sind sehr weitreichend. Neben den radiologischen Folgen für die Bevölkerung können weite Landstriche dauerhaft kontaminiert werden, so dass sie für den Menschen nicht mehr zu nutzen sind.
Die heutigen Sicherheitsstandards sehen für die Nachwärmeabfuhr mehrere redundante und diversitär ausgeführte Systeme vor. Damit soll sichergestellt werden, dass die Notkühlung weder durch Ausfälle von Teilsystemen (Einzelfehler) noch durch so genannte „Common-Mode-Ausfälle“ (Systemfehler) in ihrer Funktion beeinträchtigt werden. Allerdings besteht eine, wenn auch geringe Wahrscheinlichkeit, dass alle Wärmeabfuhrsysteme gleichzeitig ausfallen und der oben beschriebene Kernschmelzunfall eintritt.
Je nach Anlagentyp werden derzeit Häufigkeiten für das Eintreten eines Kernschmelzunfalles von 10^{-3}/a bis 10^{-6}/a angegeben (s. Abbildung 2.6). Um die Kerntechnik für die zukünftige Energieversorgung akzeptabel zu machen, muss die Sicherheit kerntechnischer Anlagen soweit verbessert werden, dass ein derartiger Unfall ausgeschlossen werden kann.
Es muss also das Ziel der Forschung sein, eine „katastrophenfreie“ Kerntechnik zur Verfügung zu stellen. Dabei bedeutet der Begriff „katastrophenfrei“, dass bei allen denkbaren Störfällen der Austritt von radioaktiven Spaltprodukten auf die

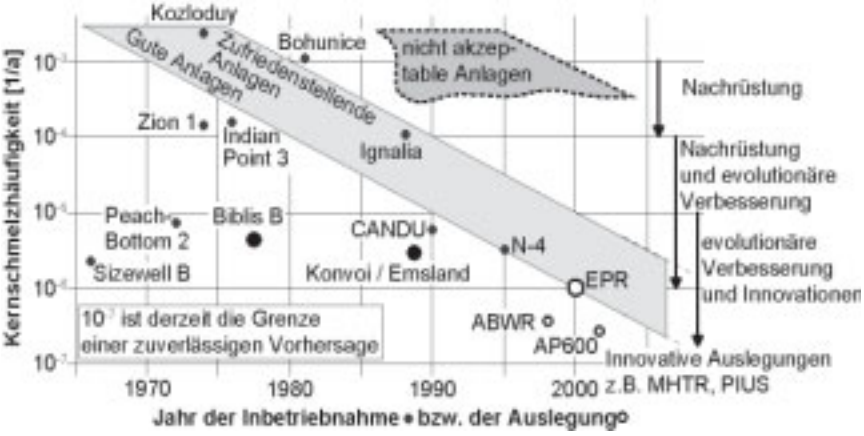

Abb. 2.6 Kernschmelzhäufigkeiten für verschiedene Kernreaktoren [11]

Anlage begrenzt bleibt. Dadurch werden gravierende Folgen für die Umgebung vermieden, wie z.B. Todesfälle, Evakuierungen, Umsiedlungen oder Vernichtung von Ernten [10].

Im Gesetz über die friedliche Nutzung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz AtG) aus dem Jahre 2000 heißt es hierzu im §7, Absatz 2a[1] [12]:

"Bei Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen, die zur Erzeugung von Elektrizität dienen, gilt die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist, mit der Maßgabe, dass zur weiteren Vorsorge gegen Risiken für die Allgemeinheit die Genehmigung nur noch erteilt werden darf, wenn auf Grund der Beschaffenheit und des Betriebes der Anlage auch Ereignisse, deren Eintritt durch die zu treffende Vorsorge gegen Schäden praktisch ausgeschlossen ist, einschneidende Maßnahmen zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen außerhalb des abgeschlossenen Geländes der Anlage nicht erforderlich machen würden; (...)"

Auf internationaler Ebene werden ähnliche Anforderungen gestellt. So nennt die International Atomic Energy Agency (IAEA) in ihren Empfehlungen für die Entwicklung neuer Reaktorkonzepte folgende Punkte [14], die berücksichtigt werden

[1] §7, Absatz 2a wurde mit dem Gesetzentwurf zur Änderung des Atomgesetzes gestrichen und ist in der aktuellen Form des Atomgesetztes nicht mehr enthalten [13]

sollen:

- die radiologischen Konsequenzen aller möglichen Auslegungsstörfälle müssen vernachlässigbar und innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen liegen
- schwere Auslegungsstörfälle dürfen keine schwerwiegenden radiologischen Auswirkungen haben
- die Wahrscheinlichkeit eines schweren Störfalles muss extrem klein sein

In Abbildung 2.7 sind mögliche Störungen des planmäßigen Betriebes kerntechnischer Anlagen anhand ihrer radiologischen Auswirkungen in der International Event Scale (INES) klassifiziert [15] und zur Verdeutlichung der verschiedenen Kategorien beispielhaft verschiedene Störfälle bzw. Unfälle aufgeführt.

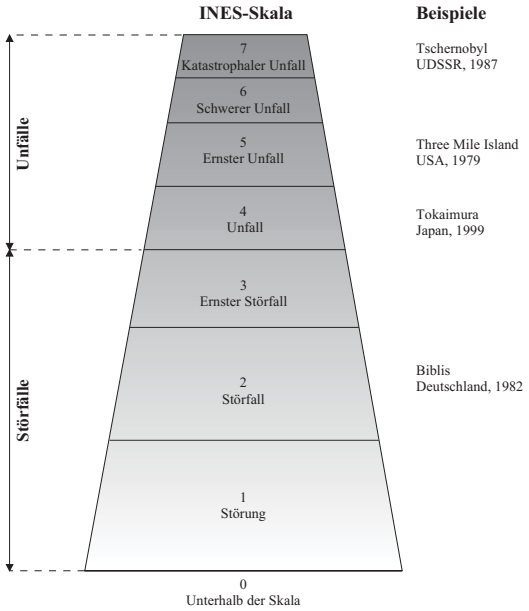

Abb. 2.7 International Event Scale (INES) [15]

Um die im deutschen Atomgesetz geforderten Vorgaben zu erfüllen, müssen bei zukünftigen Anlagen Ereignisse der Kategorien 4 - 7 gemäß der INES ausgeschlossen werden. Dies bedeutet, dass maximal ein ernster Störfall zugelassen wird, bei dem ein weitgehender Ausfall der gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen eintritt. Die dabei auftretenden schweren Kontaminationen im Inneren der Anlage

können akute Gesundheitsschäden des Bedienpersonals nach sich ziehen, dürfen jedoch nur zu einer Strahlenexposition der Bevölkerung führen, die lediglich einen Bruchteil des natürlichen Wertes erreicht.
Das heißt, dass ein langfristiger und sicherer Einschluss der radioaktiven Spaltprodukte in der Anlage nur gewährleistet ist, wenn die Abschaltung der nuklearen Kettenreaktion sichergestellt ist, der unkritische Zustand der Anlage aufrechterhalten wird und die Nachzerfallswärme sicher abgeführt wird [16]. Dies setzt voraus, dass die von Kugeler [17] beschriebenen Stabilitätskriterien für kerntechnische Anlagen permanent eingehalten werden.

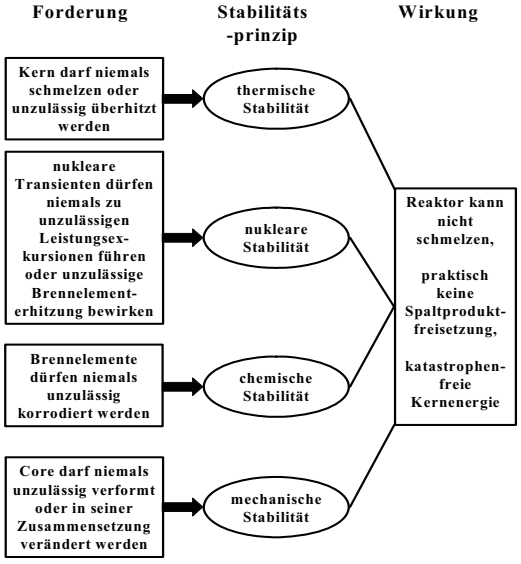

Abb. 2.8 Stabilitätskriterien für ein nicht schmelzbares Core [17]

Im Einzelnen verlangen die vier Stabilitätskriterien Folgendes:
Die Einhaltung der thermischen Stabilität erfordert eine selbsttätige Nachwärmeabfuhr, was bedeutet, dass ein nicht schmelzender Kern bzw. die Vermeidung der Überhitzung der Anlage bei allen denkbaren Störfällen gewährleistet ist. Das Reaktorsystem muss dementsprechend eine ausreichend große Wärmekapazität aufweisen und die Wärmetransportkette von dem Reaktorcore zu der nach außen liegenden Wärmesenke muss kurze Wärmetransportwege und Strukturen mit einer möglichst hohen Wärmeleitfähigkeit besitzen.