

**Untersuchungen zur
deterministischen
und probabilistischen
Bewertung von Einwir-
kungen von außen
(EVA-Ereignisse) -
Einwirkungen aus
gefährlichen Stoffen
und chemischen
Explosionen**

Untersuchungen zur
deterministischen und
probabilistischen Bewertung
von Einwirkungen von außen
(EVA-Ereignisse) -
Einwirkungen aus
gefährlichen Stoffen und
chemischen Explosionen

Burkhard Forell
Svante Einarsson

Juli 2013

Auftrags-Nr.: 813050

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 3609R01350 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Kurzfassung

Im Rahmen des BMU-Vorhabens 3609R01350 „Untersuchungen zur deterministischen und probabilistischen Bewertung von Einwirkungen von außen“ sind die standortspezifisch ggf. zu unterstellenden anlagenexternen Einwirkungen „Explosionsdruckwelle (EDW)“ und „Eindringen gefährlicher Stoffe“, untersucht worden. Neben einer Überprüfung der Robustheit der Auslegungsanforderungen des deutschen Regelwerks war es Ziel der Untersuchungen, die Behandlung dieser Einwirkungen von außen in einer PSA, insbesondere für Anlagenbetriebszustände des Nichtleistungsbetriebs, zu untersuchen.

Nach einer Erläuterung der Auslegungsanforderungen des deutschen Regelwerks gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen und gegen die Einwirkungen gefährlicher, luftgetragener Stoffe wurde beispielhaft die Umsetzung der Anforderungen für deutsche Kernkraftwerke dargelegt. Insgesamt ließ sich feststellen, dass die bautechnische Auslegung der Kernkraftwerke in Deutschland gegen chemische Explosionen bezüglich des angenommenen Überdruck-Zeit-Verlaufs und der Massen-Abstands-Beziehung sehr robust ist. Sicherheitstechnisch wichtige Gebäude sind gegen Explosionsdruckwellen entsprechend den Auslegungsanforderungen des deutschen Regelwerks ausgelegt. Gebäude, bei denen wegen der Rückhaltung radioaktiver Stoffe bei einem Störfall ein Lüftungsabschluss vorgesehen ist, sind zudem gegen das Eindringen luftgetragener gefährlicher Stoffe ausgelegt. Beim Eindringen gefährlicher luftgetragener Stoffe in die Anlage wurde zwischen Gefahrstoffen, die die Handlungsfähigkeit des Personals herabsetzen können, korrosiven Gefahrstoffen und explosionsfähiger Atmosphäre unterschieden. Automatische Vorkehrungen zur Erkennung von Gefahrstoffen der beiden ersten Kategorien sind in der Regel nicht vorhanden, eine konkrete Gefährdung der Anlagensicherheit ist dabei allerdings nicht zu unterstellen.

Obwohl eine explosionsfähige Atmosphäre prinzipiell an allen deutschen Kernkraftwerksstandorten automatisch detektiert werden kann, geht von dieser Kategorie ein besonderes Risiko bezüglich der Schadfolgen aus. Zur Auslegung der Notstrom- und Notstandsdieselaggregate gegen luftgetragene gefährliche Stoffe und Explosionsdruckwellen sind keine detaillierten Unterlagen und Konzepte verfügbar. Insofern lässt sich nicht ausschließen, dass Gasexplosionen im Bereich der Zuluftversorgung der Notstandsdieselmotoren zu einem Schließen von Brandschutzklappen in den Zuluftkanälen oder zu einer Zerstörung der Zuluftkanäle führen können.

Weiterhin wird auf die probabilistische Behandlung der beiden vorgenannten, zivilisatorisch bedingten übergreifenden Einwirkungen von außen während Betriebsphasen des Nichtleistungsbetrieb eingegangen. Die im Fachband zu PSA-Methoden des PSA-Leitfadens vorgeschlagene Vorgehensweise zur Behandlung von Explosionsdruckwellen in der PSA der Stufe 1 berücksichtigt nur die Einwirkungen von Druckwellen, nicht aber die Einwirkungen einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre auf die zu schützenden Gebäude. Die Möglichkeit des Nicht- oder Spätschließens der Lüftungssysteme von Gebäuden mit Einrichtungen des Sicherheitssystems wird nicht diskutiert.

Für die Behandlung der Einwirkungen aus chemischen Explosionen innerhalb der PSA konnte kein wesentlicher Erweiterungsbedarf gefunden werden, was auch auf die robuste Auslegung zurückzuführen ist. Die Berücksichtigung der Zuverlässigkeit des Gaswarnsystems einschließlich der zugehörigen Schalthebelungen bis zum Schließen der Gebäudezuluft erscheint aber wegen der möglichen Schadfolgen sinnvoll. Der methodische Ansatz zur Behandlung von Einwirkungen von außen in einer PSA ist für Anlagenbetriebszustände des Nichtleistungsbetriebs grundsätzlich denen des Leistungsbetriebs vergleichbar. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass sich die Randbedingungen im Nichtleistungsbetrieb ggf. erheblich von denen des Leistungsbetriebs unterscheiden. Entsprechend nationalen wie internationalen Anforderungen an eine PSA der Stufe 1 sind alle Einwirkungen von außen systematisch mittels eines gestaffelten Vorgehens in der PSA, auch bei Nichtleistungsbetrieb, zu berücksichtigen. Sofern die standortspezifisch durchzuführende Gefährdungsanalyse eine nicht zu vernachlässigende Eintrittshäufigkeit für eine bestimmte Einwirkung am zu untersuchenden Anlagenstandort ergibt, muss eine Bewertung der Häufigkeit von Brennstabschäden unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen bei Leistungs- bzw. Nichtleistungsbetriebs, ggf. auch nur mittels einer groben probabilistischen Abschätzung erfolgen.

Abstract

In the frame of the BMU project 3609R01350 "Investigations for deterministic and probabilistic assessment of external hazards" the site specific relevant hazards "explosion pressure wave" and "ingress of hazardous airborne substances" have been investigated. Major goals of the investigations were to review the robustness of the design requirements with respect to the above mentioned hazards in the German regulations and their consideration in PSA, in particular for low power and shutdown plant operational states.

First, the design requirements by the German regulatory documents on pressure waves from chemical explosions and the ingress of hazardous airborne substances and their practical applications in exemplary German plants were outlined. It can be concluded that the design of German nuclear power plants against explosion pressure waves is very robust with regard to the postulated overpressure-time-sequence and the mass-distance-correlation. According to the German regulations, buildings important to safety are designed against explosion pressure waves, and buildings where a ventilation isolation is foreseen to prevent radioactive releases in case of an accident are designed against the ingress of airborne hazardous substances.

In the context of ingress of airborne hazardous substances it has to be distinguished between hazardous substances deteriorating personnel actions, corrosive substances and explosive atmospheres. Automatic detection devices for the first two categories of substances are typically not in place, nevertheless, it does not have to be assumed that the plant safety is endangered.

Explosive atmospheres can principally be detected automatically at all German nuclear power plant sites. However, explosive gas mixtures represent a significant hazard according to their potential damage and consequences. Detailed concepts and documentation regarding design of emergency power supplies and emergency diesels against airborne hazardous substances and explosion pressure waves are not available. Therefore, gas explosions close to the air inlets of the emergency diesel generators resulting in the closure of fire dampers or destruction of ventilation inlet ducts cannot be excluded completely.

Moreover, the consideration of the above mentioned man-made external hazards within PSA, in particular for low power and shutdown plant operational states has been

investigated. The approach of the technical document on PSA methods supporting the German PSA guide for treating explosion pressure waves in Level 1 PSA does only consider explosion pressure waves, but not the impact of a hazardous explosive atmosphere to the buildings to be protected. It is not considered in this approach that there is a chance that the ventilation systems of buildings containing items important to safety are not closed or closed at a later point.

With respect to PSA-methods for treating chemical explosions no significant potential enhancements to the methods have been identified, which also is a result of the robust design. However, according to the potential damage and consequences, the reliability of the gas detection system as well as of the corresponding human actions until the ventilation inlets have been closed seems to be reasonable.

The approach for considering external hazards in PSA is principally the same for full power as well as for low power and shutdown states. Nevertheless, it has to be considered that the boundary conditions may differ significantly. According to national as well as international requirements for Level 1 PSA all external hazards have to be systematically addressed by means of a graded approach, in particular for low power and shutdown PSA. In case that the site specific hazard analysis for a given hazard provides a non-negligible occurrence frequency for the site under investigation, the frequency of fuel element damage has to be estimated, by a rough calculation or by detailed analyses under consideration of the specific boundary conditions for full power and/or low power and shutdown plant operational states.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Auslegungsanforderungen gegen Druckwellen aus chemischen Explosionen und gefährlichen luftgetragenen Stoffen	3
2.1	Anforderungen der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke	3
2.1.1	Auslegungsanforderungen bezüglich anlagenexterner Explosion	3
2.1.2	Auslegungsanforderungen bezüglich gefährlicher Stoffe	4
2.2	Druckwellenrichtlinie des BMI von 1976.....	5
2.2.1	Auslegungsanforderungen an die zu schützenden Gebäude	6
2.2.2	Einhaltung von Mindestabständen beim Umgang mit explosionsfähigen Stoffen.....	7
2.3	RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren	9
3	Umsetzung der Regelwerksanforderungen	11
3.1	Umsetzung am Beispiel eines Kernkraftwerks mit Druckwasserreaktor ...	11
3.1.1	Explosionsdruckwelle	12
3.1.2	Eindringen standortspezifisch zu unterstellender giftiger bzw. explosionsfähiger Gase	16
3.2	Umsetzung am Beispiel eines Kernkraftwerks mit Siedewasserreaktor ...	20
3.2.1	Explosionsdruckwelle	20
3.2.2	Eindringen standortspezifisch zu unterstellender gefährlicher Gase	21
4	Robustheitsbetrachtungen	25
4.1	Robustheit der Auslegung gegen Explosionsdruckwellen	25
4.1.1	Vergleich des Maximaldrucks nach Druckwellenrichtlinie mit dem Modell der TNO	25
4.1.2	Vergleich der Massen-Abstand-Beziehung nach Druckwellenrichtlinie mit TNT-Vergleichsmodell.....	26
4.2	Robustheit der Auslegung gegen gefährliche luftgetragene Stoffe	30
4.2.1	Gefahrstoffe, die die Handlungsfähigkeit des Personals herabsetzen können.....	31
4.2.2	Korrosive Gefahrstoffe	34

4.2.3	Explosionsfähige Atmosphäre.....	35
4.3	Robustheit der Auslegung der Notstrom- bzw. Notstandsdieselaggregate	39
5	Berücksichtigung von Einwirkungen durch Eindringen gefährlicher Stoffe und chemische Explosionen in der PSA für Kernkraftwerke in Deutschland	41
5.1	Methodisches Vorgehen nach PSA-Methodenband.....	41
5.2	Anmerkungen zum Vorgehen nach PSA-Methodenband	44
5.3	Notwendigkeit zur Berücksichtigung der besonderen Umstände und Randbedingungen des Nichtleistungsbetriebs in der PSA	46
6	Schlussfolgerungen und weiterer Untersuchungsbedarf.....	51
7	Literatur	55

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Druckverlauf am Kernkraftwerksgebäude gemäß /BMI 76/	6
Abb. 2-2: Massen-Abstands-Beziehung gemäß /BMI 76/	7
Abb. 3-1: Auslegung der Hauptgebäude gegen Einwirkungen von außen nach /BOH 86/, ergänzt	12
Abb. 4-1: TNT-Vergleichsmodell in der im Yellow-Book /BOS 05/ dargestellten Form 28	
Abb. 4-2: Anreicherung von Stoffen in Anlagenräumen in Abhängigkeit der Luftwechselzahl	32
Abb. 4-3: Anreicherung von Kohlenmonoxid in Anlagenräumen bei einer Außenkonzentration von $c_{A,CO} = 1500$ ppm und einem Luftwechsel von 10 h^{-1}	33
Abb. 4-4: Entwicklung der Fractional Effective Dose für in Anlagenräumen exponiertes Kraftwerkspersonal bei dem beschriebenen konservativen Szenario	34

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: Bauwerke, die gegen Explosionsdruckwelle (EDW) bzw. Ansaugen explosionsfähiger Gase (AEG) ausgelegt sind.....	13
Tab. 3-2: Systeme, die gegen durch Explosionsdruckwelle induzierte Erschütterungen ausgelegt sind (Beispiel: DWR vom Typ Konvoi)	14
Tab. 3-3: Gebäude und Anlagenbereiche die gegen Explosionsdruckwelle (EDW) bzw. Ansaugen explosionsfähiger Gase (AEG) ausgelegt sind.....	20
Tab. 4-1: Verbrennungsenthalpie Δh_c , resultierender TNT-Äquivalenzfaktor θ , Umsetzungsgrad η und resultierender massenspezifische Äquivalenzfaktor α_m für häufig auftretende Gase und Dämpfe /NEN 02/, /ACI 00/	29
Tab. 4-2: Explosionsgrenzen von brennbaren Gasen und Flüssigkeiten in Luft /BRA 88/, /BRA 03/.....	36
Tab. 5-1: Gestaffeltes Nachweisverfahren zur Explosionsdruckwelle (aus /FAK 05/)	43

1 Einleitung

Das vom BMU geförderte Vorhaben 3609R01350 „Untersuchungen zur deterministischen und probabilistischen Bewertung von Einwirkungen von außen (EVA-Ereignissen) umfasst folgende drei Arbeitspakete (AP):

- AP 1: „Deterministische Untersuchung der Widerstandsfähigkeit deutscher Kernkraftwerke gegen Einwirkungen von außen, unter Berücksichtigung aktueller Erkenntnisse hinsichtlich der anzusetzenden Einwirkungen“,
- AP 2: „Entwicklung der Grundstruktur eines integralen Vorgehens, mit dem es möglich ist, den gesamten Ereignisablauf eines unfallbedingten Absturzes eines Flugzeugs auf ein Kernkraftwerk im Leistungsbetrieb einheitlich zu erfassen und zu bewerten“ und
- AP 3 „Weiterentwicklung der Methoden zur Behandlung übergreifender Einwirkungen von außen in einer PSA für den Nichtleistungsbetrieb“.

AP 1 umfasst dabei auftragsgemäß die Einwirkungen aus Erdbeben, extremen Wasserständen, Windlasten, Vereisung und gefährlichen Stoffen. Das Arbeitspaket AP 3 betrifft auftragsgemäß die Behandlung der zivilisatorisch bedingten Einwirkungen von außen „Explosionsdruckwelle“ und „Eindringen gefährlicher Stoffe“. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf deren Behandlung in einer PSA für Anlagenbetriebszustände des Nichtleistungsbetriebs.

Gefährliche Stoffe werden üblicherweise entsprechend ihrer Gefährlichkeitsmerkmale unterschieden. Stoffe mit den Merkmalen „hochentzündlich“, „leichtentzündlich“ und „entzündlich“ nach bisheriger Gefahrstoffverordnung /GEF 13/ sind in der Lage, als Gase oder Dämpfe mit Luft eine explosionsgefährliche Atmosphäre zu bilden, bei deren Zündung eine Explosionsdruckwelle (EDW) auftritt. Eine weitere Möglichkeit zur Entstehung einer EDW ist die Zündung von Explosivstoffen („explosionsgefährlichen“ Stoffen), wobei hier keine atmosphärische Freisetzung stattgefunden hat und somit auch das Eindringen der Stoffe in eine Kraftwerksanlage auf dem atmosphärischen Pfad nicht unterstellt werden braucht. Auftragsgemäß ist die Einwirkung aus einer EDW insbesondere für Anlagenbetriebszustände des Nichtleistungsbetriebs einschließlich deren Behandlung in einer PSA zu untersuchen, wobei das Eindringen luftgetragener gefährlicher Stoffe einschließlich explosionsfähiger Gaswolken in die Anlage eine bisher im Fachband zu PSA-Methoden /FAK 05/ nicht betrachtete Gefährdung

darstellt. Aufgrund der sich überschneidenden Fragestellungen wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber festgelegt, den Aspekt luftgetragener gefährlicher Stoffe in den Arbeitspaketen AP 1 und AP 3 in einen Bericht zu behandeln.

Im Kapitel 2 dieses Berichts werden die Auslegungsanforderungen des deutschen Regelwerks gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen und gegen die Einwirkungen von gefährlichen luftgetragenen Stoffen erläutert. In 3. Kapitel wird beispielhaft die Umsetzung der Anforderungen für deutsche Kernkraftwerke dargestellt. Im Kapitel 4 wird die Robustheit der generischen Auslegungsanforderungen überprüft. Dabei werden verschiedene Modelle zur Abschätzung von Explosionswirkungen mit der Auslegung nach BMI-Richtlinie verglichen. Bezüglich der Auslegung gegen gefährliche luftgetragene Stoffe werden Betrachtungen zur Erkennbarkeit von Stoffen und zu Folgen des Versagens von Lüftungsabschlüssen angestellt. In Kapitel 5 wird auf die probabilistische Behandlung dieser Einwirkungen von außen eingegangen. Dabei wird auch auf erkannte Schwächen der probabilistischen Analysen entsprechend PSA-Leitfaden und seinen Fachbänden hingewiesen. In Kapitel 6 werden Schlussfolgerungen zu den Untersuchungen gezogen und der weitere Untersuchungsbedarf dargestellt.

2 Auslegungsanforderungen gegen Druckwellen aus chemischen Explosionen und gefährlichen luftgetragenen Stoffen

2.1 Anforderungen der Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke

Das aktuelle deutsche kerntechnische Regelwerk und damit insbesondere die „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“ /BMU 12/ enthalten im Anhang 3 in Abschnitt 4 „Anforderungen zur Beherrschung von Einwirkungen von außen sowie Notstandsfällen“ auch Anforderungen an die Auslegung von Kernkraftwerken gegen die hier zu untersuchenden Einwirkungen „Explosionsdruckwelle“ und „Eindringen gefährlicher Stoffe“.

2.1.1 Auslegungsanforderungen bezüglich anlagenexterner Explosion

In Abschnitt 4.2.2.2 des Anhangs 3 von /BMU 12/ werden Anforderungen zur Auslegung gegen „Anlagenexterne Explosion“ gestellt.

Als wesentliche Anforderung an die bauliche Auslegung für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen wird auf die Druckwellen-Richtlinie des Bundesministeriums des Inneren /BMI 76/ (vgl. Abschnitt 2.2) Bezug genommen, sofern keine Hinweise auf höher zu erwartende Druckverläufe vorliegen.

Bezüglich der zu betrachtenden Explosionsphänomene werden in /BMU 12/ auch Phänomene wie „Deflagrationen mit partieller Detonation (DDT)“ aufgeführt, über die zum Zeitpunkt der Erstellung der BMI-Richtlinie /BMI 76/ nur sehr wenig bekannt war. Eine Detonation in der Nähe eines zu schützenden Gebäudes wurde in /BMI 76/ für eine Gaswolke, die beliebig nahe an ein zu schützendes Gebäude herandriften kann, nicht angenommen.

Ferner wird in /BMU 12/ gefordert, dass die zur Beherrschung von Ereignisabläufen nach Explosionen erforderlichen sicherheitstechnisch wichtigen Lüftungsanlagen durch Explosionseinwirkungen nicht unzulässig beeinträchtigt werden dürfen.

2.1.2 Auslegungsanforderungen bezüglich gefährlicher Stoffe

In Abschnitt 4.2.2.3 des Anhangs 3 der /BMU 12/ werden Anforderungen zur Auslegung gegen gefährliche Stoffe gestellt. Bezüglich der unterschiedlichen Schutzgüter werden zunächst zwei Stoffspektren unterschieden:

- a) Stoffe, die kurzfristig oder langfristig zum Ausfall der Funktion sicherheitstechnisch wichtiger Anlagenteile führen können. Dabei handelt es sich um:
 - explosionsfähige,
 - entzündliche,
 - den in der Dieselmotorschwefelgasen enthaltenen Sauerstoff verdrängende oder verzehrende,
 - verstopfende und
 - korrosive Stoffe.
- b) Stoffe, die die erforderliche Handlungsfähigkeit des Personals gefährden. Das sind:
 - giftige,
 - narkotische,
 - ätzende,
 - Sauerstoff verdrängende,
 - Sauerstoff verzehrende,
 - explosionsfähige und
 - radioaktive Stoffe.

Dieses Spektrum wurde mit Ausnahme der radioaktiven Stoffe bereits in den Interpretationen zum Sicherheitskriterium 2.6 der „Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke“ /BMI 79/ genannt. In diesen Interpretationen wurden zu einigen Gefährlichkeitsmerkmalen auch konkrete Bezüge genannt. So bezieht sich in /BMI 79/ „explosionsfähig“ auf die Definition der Druckwellenrichtlinie des BMI /BMI 76/, die Begriffe „giftig“, „ätzend“, „leicht entzündlich“ und „entzündlich“ hingegen beziehen sich auf die damalige Arbeitsstoffverordnung, der heute die Gefahrstoffverordnung /GEF 13/ entspricht. Die Gefährlichkeitsmerkmale werden im Abschnitt 4.2 erläutert.

In /BMU 12/ werden geeignete Maßnahmen oder Einrichtungen gefordert um sicherzustellen, dass gefährliche Stoffe die Sicherheit der Anlage und die Handlungsfähigkeit des Personals nicht unzulässig beeinträchtigen. Dabei sind folgende Gesichtspunkte maßgebend:

- Standortspezifisch zu unterstellendes Vorkommen gefährlicher Stoffe (ortsfest oder auf Verkehrswegen),
- deren Eindringmöglichkeiten in Gebäude,
- deren Einwirkungsmechanismen, einschließlich des zeitlichen Verlaufs (z. B. der Konzentration) sowie
- Möglichkeiten zu deren Erkennung und Überwachung.

Zur Erkennung des Auftretens bzw. der Freisetzung gefährlicher Stoffe und zur Einleitung notwendiger Personalhandlungen sind entsprechende organisatorische Maßnahmen zu treffen und, soweit notwendig und möglich, Einrichtungen zu schaffen.

Die Zugänglichkeit der Warte oder Notsteuerstelle und der dauerhafte Aufenthalt dort sind auch während der Einwirkung gefährlicher Stoffe in dem für die Gewährleistung der Schutzziele erforderlichen Umfang durch die Bereitstellung von Schutzausrüstung sicherzustellen.

2.2 Druckwellenrichtlinie des BMI von 1976

Die „Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen durch Auslegung der Kernkraftwerke hinsichtlich ihrer Festigkeit und indizierter Schwingungen sowie Sicherheitsabstände“, Stand August 1976, (auch als Druckwellenrichtlinie bezeichnet) /BMI 76/ konkretisiert den nach dem Atomgesetz (AtG) zu gewährleistenden Schutz gegen bestimmte Einwirkungen von außen. Die Erfüllung der Anforderungen dieser Richtlinie war seit der Bekanntmachung im September 1976 Teil der Genehmigungsvoraussetzungen für Kernkraftwerke. Unabhängig davon können standortspezifische Randbedingungen eine höherwertige Auslegung gegen Druckwellen erfordern, wie z. B. nahe an Verkehrsflüssen gelegene sicherheitstechnisch erforderliche Pumpenhäuser.

Die Richtlinie stellt Anforderungen an

- a) die Auslegung der zu schützenden Gebäude, einschließlich Anforderungen an die Umgebungsgestaltung sowie
- b) die Einhaltung von Mindestabständen beim Umgang mit explosionsfähigen Stoffen.

2.2.1 Auslegungsanforderungen an die zu schützenden Gebäude

Gemäß den Auslegungsanforderungen müssen die zu schützenden Gebäude hinsichtlich ihrer Festigkeit sowie induzierter Schwingungen einen Druckverlauf am Gebäude gemäß Abb. 2-1 abtragen können. Der Spitzenüberdruck nach 0,1 s beträgt dabei 0,45 bar. 0,2 s nach Beginn des Druckanstiegs ist der Überdruck auf 0,3 bar gefallen und verbleibt auf dem Niveau mindestens 1 s lang allseitig quasistatisch. Falls mehrfache Explosionen nicht ausgeschlossen werden können, ist eine Auslegung gegen mehrfache, sich nicht überlagernde Explosionen erforderlich. Es ist davon auszugehen, dass die Druckwelle aus jeder Richtung kommen kann.

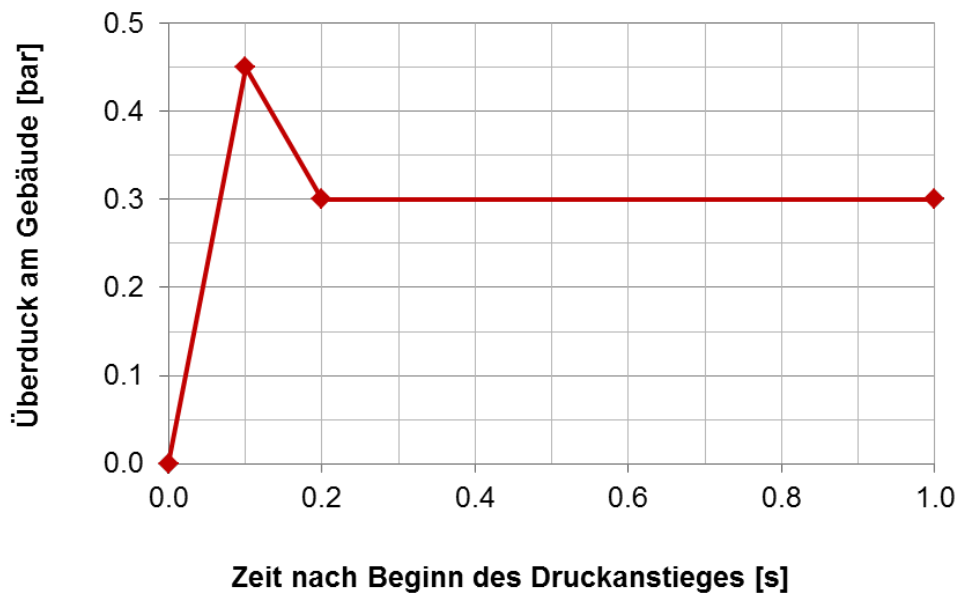


Abb. 2-1: Druckverlauf am Kernkraftwerksgebäude gemäß /BMI 76/

Zusätzlich wird bei der Planung von Innenhöfen und Gassen von Kernkraftwerken gefordert, dass diese Druckentlastungsflächen von mindestens 20 % der einschließenden Fläche aufweisen. Bei der Gestaltung von Gebäuden der Kraftwerksanlage müssen

- fokussierende Anordnungen von Gebäuden,
- langgestreckte Gassen,
- nur nach oben offene, kubusförmige Höfe und
- turbulenz erzeugende Strukturen

vermieden werden.

2.2.2 Einhaltung von Mindestabständen beim Umgang mit explosionsfähigen Stoffen

Die Abstandsanforderungen in Form einer Massen-Abstands-Beziehung gelten für den „Umgang“ mit „explosionsfähigen“ Stoffen im Sinne der Richtlinie /BMI 76/. Der Begriff „explosionsfähig“ bezieht sich dabei auf:

- Sprengstoffe oder instabile Stoffe, die in der Fest- oder Flüssigphase reagieren, sowie
- brennbare Gase und Flüssigkeiten, die mit Luft explosionsfähige Atmosphären bilden können.

Der Begriff „Umgang“ wird in der Richtlinie ebenfalls näher definiert, und es werden Einrichtungen genannt (Ziffer IV, Nr. 2), die als Orte des Umgangs mit explosionsfähigen Stoffen betrachtet werden müssen.

Die Massen-Abstands-Beziehung (Abb. 2-2) lautet

$$R = 8 L^{1/3}$$

mit R Sicherheitsabstand in m
L die zu Grunde zu legende Masse des explosionsfähigen Stoffes in kg

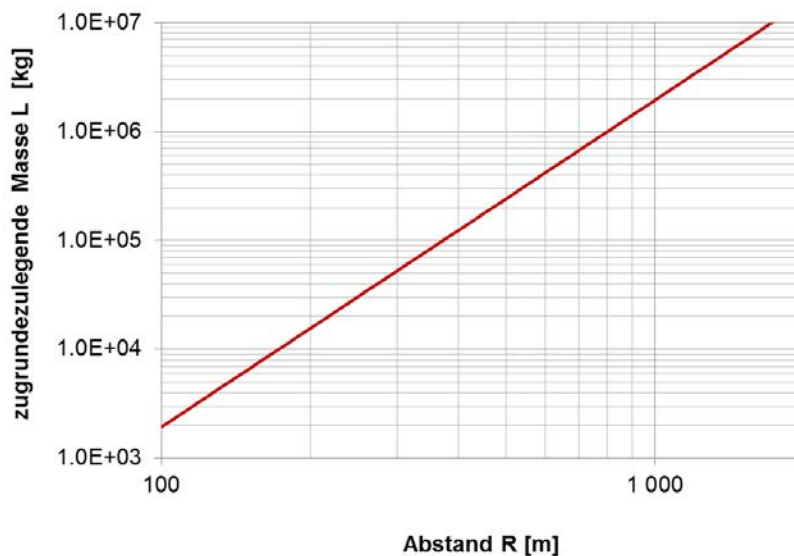


Abb. 2-2: Massen-Abstands-Beziehung gemäß /BMI 76/

Innerhalb eines Abstands von $R = 100$ m darf ohne gesonderte Prüfung kein Umgang mit explosionsfähigen Stoffen stattfinden.

Bei der Festlegung der zu Grunde zu legenden Masse L ist sowohl die Art des Stoffs, als auch der Lagerungszustand zu berücksichtigen. Für explosionsgefährliche Sprengstoffe ist die Masse L als TNT-Äquivalent einzusetzen. Für Kohlenwasserstoffe mit C-dreifach- oder kumulierten C-zweifachfach-Bindungen (z. B. Alkine (Acetylen), Polyine (Polyacetylen), Allene (Propadien $H_2C=C=CH_2$), Kumulene, MAPP-Gase) ist für L ebenfalls die Gesamtmasse des Stoffs einzusetzen (Abs. 1b).

Die vorgenannten Stoffe können in einer driftenden Gaswolke explodieren, wodurch der Abstand des Explosionsortes zum zu schützenden Gebäude nicht bestimmbar ist. Sie werden trotzdem über die Massen-Abstands-Beziehung ohne Abzüge für Freisetzungsszenarien erfasst (siehe nächster Absatz), d. h. es ist immer von der gesamten Lagermenge auszugehen. Der Grund für diese konservative Vorgehensweise ist, dass man für diese Stoffe eine Gaswolkendetonation nicht ausschließen konnte. Weitere Betrachtungen hierzu erfolgen in Abschnitt 4.1 dieses Berichts.

Für die übrigen explosionsfähigen Stoffe ist deren Lagerzustand zu berücksichtigen (Abs. 1c). Es sind bei

- nicht verflüssigten Gasen 100 % der Masse,
- unter Druck verflüssigten Gasen 50 % der Masse,
- tiefkalt verflüssigten Gasen 10 % der Masse und
- brennbaren Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt unter 21°C 0,3% der Masse

anzusetzen.

Als Bezugsmasse gilt jeweils die Masse des am Ort befindlichen größten Produktions-, Lager- oder Transportbehälters (Einzeltank).

Sind aufgrund der Art der explosionsfähigen Stoffe der Absatz 1b) und der Absatz 1c) gleichzeitig anzuwenden, so ist der sich ergebene größere Sicherheitsabstand einzuhalten.

Falls der Sicherheitsabstand für eine gegebene Stoffmenge nicht eingehalten werden kann, sieht die Richtlinie die Möglichkeit zur Ergreifung primärer Maßnahmen zur Verhinderung einer Druckwelle vor oder die bauliche Auslegung muss gegenüber dem in Abb. 2-2 dargestellten Druckverlauf erhöht werden. Laut Richtlinie ist es für den Fall des Umgangs mit explosionsgefährlichen Stoffen innerhalb der Sicherheitsabstände ebenfalls erforderlich, die Luftansaugöffnungen des Kernkraftwerks in ausreichender Zahl mit ortsfest installierten Gaswarngeräten auszustatten. Die Gaswarngeräte müssen geeignet sein, eindringende explosionsfähige Gase sicher nachzuweisen und die rechtzeitige Durchführung von Schutzmaßnahmen wie dem Schließen von Absperrklappen zu ermöglichen. Von der Forderung kann abgewichen werden, wenn andere technisch-administrative Maßnahmen zur Verfügung stehen.

Diese Verwendung von Gaswarngeräten und Absperrklappen ist unabhängig der Anforderung in /BMI 76/ immer erforderlich, da eine Gaswolke driften kann. Gaswarngeräte werden bei allen in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken in Deutschland eingesetzt /RSK 11/.

2.3 RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren

Die Auslegung gegen gefährliche luftgetragene Stoffe und Druckwellen aus chemischen Explosionen ist ein Teil der Auslegungsanforderungen gegen zivilisatorische Einwirkungen gemäß RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren /RSK 96/. Dort wird in Abschnitt 19.2 „*Chemische Explosionen*“ eine Auslegung gemäß Druckwellenrichtlinie von 1976 /BMI 76/ gefordert. Ergänzend besteht die Forderung, dass für die Konzeptberatung eine Liste der gegen Druckwellen und gegen die dadurch induzierten Schwingungen auszulegenden Gebäude- und Anlagenteile vorzulegen ist.

Bezüglich gefährlicher luftgetragener Stoffe bestehen in Abschnitt 19.3 „*Giftige und explosionsgefährliche Gase*“ folgende Forderungen:

„(1) Es ist aufzuzeigen, wie das Eindringen standortbedingter giftiger Gase in Räume festgestellt und verhindert werden kann, in denen der Aufenthalt von Personal möglich sein muss.

(2) Das Ansaugen standortbedingter explosionsgefährlicher Gase in sicherheitstechnisch wichtige Bereiche ist zu verhindern oder durch Redundanz und räumliche Tren-

nung sowie sichere Lage der Ansaugöffnungen so einzuschränken, dass die Erfüllung der sicherheitstechnischen Funktion gewährleistet wird.

(3) Während der Lebenszeit der Anlage sind die Maßnahmen nach (1) und (2) den sich ändernden Gegebenheiten anzupassen.“

Eine Konkretisierung des zu betrachtenden Stoffspektrums, z. B. durch Nennung von Gefährlichkeitsmerkmalen, erfolgt in /RSK 96/ nicht.

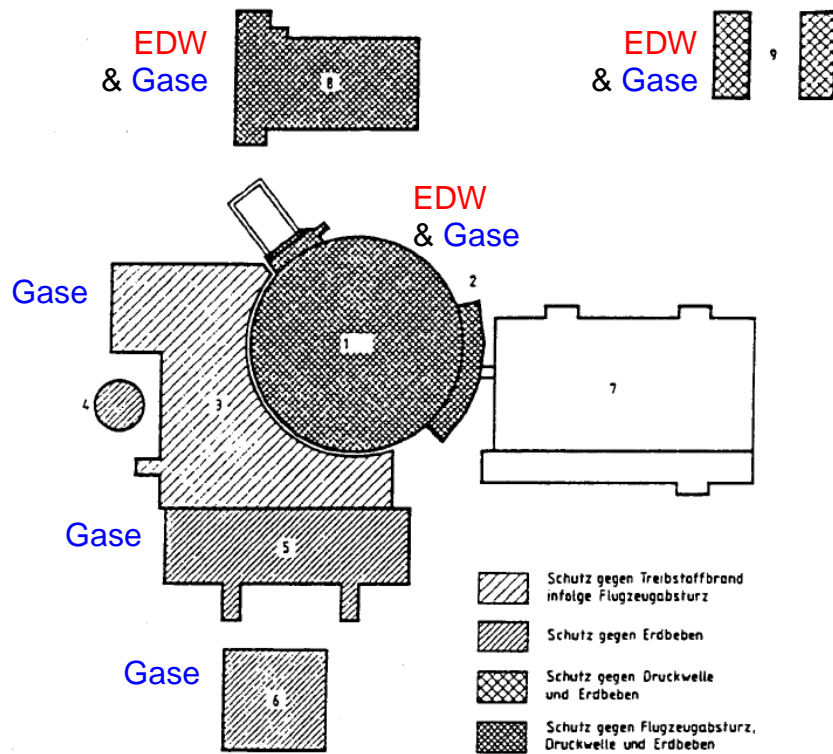
3 Umsetzung der Regelwerksanforderungen

Nachfolgend wird die Umsetzung der Anforderungen des deutschen kerntechnischen Regelwerks in Bezug auf die standortspezifisch zu unterstellenden, zivilisatorisch bedingten Einwirkungen von außen „Explosionsdruckwelle aus chemischen Explosionen“ und „Eindringen gefährlicher Stoffe“ für Kernkraftwerke in Deutschland, sowohl mit Druckwasserreaktor (DWR) als auch mit Siedewasserreaktor (SWR), anhand von Referenzanlagen beispielhaft behandelt.

3.1 Umsetzung am Beispiel eines Kernkraftwerks mit Druckwasserreaktor

Die Umsetzung der Regelwerksanforderungen in Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktor wurde am Beispiel einer DWR-Referenzanlage vom Typ Konvoi untersucht. Die nachfolgenden Abschnitte beziehen sich immer auf die Umsetzung in dieser Referenzanlage.

Die grundsätzliche Auslegung der sicherheitstechnisch wichtigen Gebäude gegen die die naturbedingten und zivilisatorischen Einwirkungen von außen Erbeben, Flugzeugabsturz mit Treibstoffbrand, Explosionsdruckwelle und gefährliche Gase ist in Abb. 3-1 dargestellt.



1 Reaktorgebäude, 2 Frischdampf- und Speisewasserarmaturenkammern, 3 Reaktorhilfsanlagengebäude, 4 Fortluftkamin, 5 Schaltanlagegebäude, 6 Notstromerzeugergebäude und Kaltwasserzentrale, 7 Maschinenhaus, 8 Notspeisegebäude, 9 Nebenkühlwasserpumpenbauwerke

Abb. 3-1: Auslegung der Hauptgebäude gegen Einwirkungen von außen nach /BOH 86/, ergänzt

Das Reaktorgebäude, das Notspeisegebäude und die Notnebenkühlwasserversorgung sind sowohl gegen Explosionsdruckwelle, als auch gegen den Eintritt gefährlicher Gas ausgelegt. Hilfsanlagengebäude, Schaltanlagegebäude und Notstromerzeugergebäude mit Kaltwasserzentrale sind dagegen nur gegen den Eintritt gefährlicher Gase ausgelegt. Das Maschinenhaus hat keine explizite Auslegung gegen die betrachteten Einwirkungen von außen erfahren.

3.1.1 Explosionsdruckwelle

Für Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktor (DWR) vom Typ Vorkonvoi bzw. Konvoi wird die Einwirkung Explosionsdruckwelle als Ereignis mit einer sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit eingestuft. Daher muss auch kein Einzelfehler oder Reparatur-

fall für die Nachkühlkette und sonstigen notwendigen Sicherheitssysteme unterstellt werden.

Aufgrund der großflächigen Auswirkung der Explosionsdruckwelle auf alle sicherheitstechnisch wichtigen Gebäude kann nicht der Abstand von Gebäuden mit gleichen Systemfunktionen kreditiert werden; vielmehr ist ein baulicher Schutz erforderlich. Da durch den baulichen Schutz unter Berücksichtigung aller auftretenden Lasten das Reaktorkühlsystem nicht beeinträchtigt wird, müssen Kühlmittelverluststörfälle nicht als Folge betrachtet werden (vgl. dazu auch Abschnitt 5.1).

Der Auslegung gegen „chemische Explosionen“ liegen die Druckwellenrichtlinie des Bundesministerium des Inneren (BMI) /BMI 76/ und die RSK-Leitlinien für DWR /RSK 96/ zugrunde. Dazu gehört als Auslegungsanforderungen der Druckverlauf an den zu schützenden Gebäuden nach Abb. 2-1. In Tab. 3-1 sind die gegen Explosionsdruckwelle (EDW) bzw. Ansaugen explosionsfähiger Gase (AEG) geschützten Bauwerke für DWR-Anlagen vom Typ Konvoi bzw. Vorkonvoi dargestellt. Weiterhin werden in Tab. 3-2 Systeme dargestellt, die gegen durch Explosionsdruckwelle indizierte Erschütterungen ausgelegt sind (Beispiel Konvoi-DWR).

Tab. 3-1: Bauwerke, die gegen Explosionsdruckwelle (EDW) bzw. Ansaugen explosionsfähiger Gase (AEG) ausgelegt sind

Gebäude / Bauwerk	Anforderung	
	EDW	AEG
Schaltanlagegebäude		X
Notstromerzeugergebäude und Kaltwasserzentrale		X
Reaktorgebäude-Innenraum	X	X
Reaktorgebäude-Ringraum	X	X
FD- und Speisewasser-Armaturenkammern, Materialschleusenumbauung mit Treppenturm sowie Halbportalgerüst	X	
Reaktor-Hilfsanlagegebäude		X
Notspeisegebäude	X	X
Rohr- und Kabelkanäle zwischen Notspeisegebäude und Reaktorgebäude	X	
Notnebenkühlwasser-Entnahmebauwerk	X	

Gebäude / Bauwerk	Anforderung	
	EDW	AEG
Notnebenkühlwasser-Pumpenbauwerk	X	X
Nebenkühlwasser-Pumpenbauwerke		X

Tab. 3-2: Systeme, die gegen durch Explosionsdruckwelle induzierte Erschütterungen ausgelegt sind (Beispiel: DWR vom Typ Konvoi)

Lager für bestrahlte Brennelemente Einrichtungen im Reaktorraum Einrichtungen für Abstellraum BE-Beckenkühlsystem Restentleerung Reaktor-/Abstellraum; Anschlussleitung an Behälterbecken RDB komplett mit Steuerelementen und Einbauten Zusatzboriersystem Reaktorkühlsystem Hauptkühlmittelabblasesystem Sperrwasserversorgung von den HKMP aus bis hinter der zweiten PKA-Armatur Sicherheitsbehälter mit Durchführungen und Gebäudeabschlussarmaturen Leckabsaugesystem Nachkühlkreislauf Red. 1-4 HD-Einspeisesystem Druckspeichereinspeisesystem Borwasserlagerung Funktionsprüfsystem Nukleares Zwischenkühlsystem Volumenregelsystem Anlagenentwässerung Probenahmesystem Speisewasserleitungssystem Notspeisesystem Notspeisepumpe Frischdampfleitungssystem Dampferzeugerabschlämmsystem Reinigungsanlage für gesicherte und nukleare Zwischenkühler Strang 1-4 Probeentnahmesystem Störfall-Lüftungsanlage für Notspeisegebäude Notstromdieselanlage Lüftungstechnische Anlagen innerhalb Notnebenkühlwasserbauwerk Nebenkühlwassersystem für gesicherte Anlagen
--

Sicherheitstechnisch wichtige Bauwerke sind so ausgelegt, dass hinreichende Abstände zu solchen Gebäuden bestehen, die nicht gegen EDW ausgelegt sind. Die für den Zustand „Nulllast, heiß“ benötigten verfahrenstechnischen und leittechnischen Systeme sind für einen Betrieb von zehn Stunden ohne die Notwendigkeit von Eingriffen des Kraftwerkspersonals ausgelegt.

Die nachfolgend genannten kerntechnischen Schutzziele müssen in Falle einer Explosionsdruckwelle eingehalten werden. Die Umsetzung ist in der Referenzanlage vom Typ Konvoi-DWR durch nachstehende Auslegung verwirklicht:

Abschaltung des Reaktors

Der Schnellabschaltung erfolgt nach einer Explosionsdruckwelle durch Ansprechen eines Grenzwertes (mehrere Signale sind möglich) des Reaktorschutzes. Die Schnellabschaltung ist auch sichergestellt, wenn die Stromversorgung ausgefallen ist, da die Steuerelemente bei jeder Stromunterbrechung ihrer elektromagnetischen Haltespulen infolge Schwerkraft in den Reaktorkern einfallen und ihn abschalten.

Langfristige Unterkritikalität

Die langfristige Unterkritikalität wird durch das Zusatzboriersystem erreicht. Das System einschließlich der benötigten Pumpen befindet sich im Reaktorgebäude-Ringraum. Das System ist damit in einem gegen EDW gesicherten Bereich angeordnet.

Nachwärmeabfuhr

Zwei Redundanzen der Notnachkühlketten, von denen eine für die Wärmeabfuhr ausreicht, stehen nach Explosionsdruckwellen für die langfristige Nachwärmeabfuhr zur Verfügung. Wie auch für andere seltene EVA-Ereignisse wird davon ausgegangen, dass nach einer EDW kein Personal zur Verfügung steht. Die erforderlichen Maßnahmen sind so ausgelegt, dass sie in den ersten zehn Stunden automatisch ablaufen können. Weiterhin sind die Notnachkühlketten durch räumliche Trennung und durch entsprechende Auslegung gegen EDW geschützt.

Im Notspeisegebäude befinden sich die erforderliche Mess-, Steuer- und Regeltechnik der benötigten Teile des Reaktorschutzsystems und die der Energieversorgung dienenden Notspeisedieselmotoren mit Kraftstoffvorrat für mindesten 24 Stunden sowie die erforderlichen Vorräte an Deionat. Daher kann auf einen baulichen Schutz gegen EDW für das Schaltanlagegebäude, Maschinenhaus, Notstromerzeugungsgebäude mit Kaltwasserzentrale, Hauptkühlwasserversorgung und Kühlturbauwerke Nebenkühlwasser verzichtet werden. Die Verbindung vom Notspeisegebäude zum Reaktorgebäude ist ebenfalls gegen EDW ausgelegt.

Begrenzung der Aktivitätsfreisetzung

Das Reaktorgebäude ist baulich gegen Einwirkungen von außen einschließlich EDW geschützt, so dass der überwiegende Anteil des Inventars radioaktiver Stoffe der Gesamtanlage geschützt ist. Innerhalb des Reaktor-Hilfsanlagengebäudes befindet sich ebenfalls radioaktives Inventar. Eine spezifische Auslegung gegen EDW wird für das Reaktor-Hilfsanlagengebäude nicht nachgewiesen. Stattdessen wird mit Hinweis auf den Schutz gegen Flugzeugsabsturz dargestellt, dass das radioaktive Inventar geschützt ist, indem das Eindringen von Wrackteilen eines Flugzeugs und einer unzulässige Menge an Treibstoff in das Gebäudeinnere verhindert werden.

3.1.2 Eindringen standortspezifisch zu unterstellender giftiger bzw. explosionsfähiger Gase

Standortspezifisch zu unterstellende giftige oder explosionsfähige Gase können in sicherheitsrelevanten Gebäuden durch offene Lüftungsöffnungen, Schleusen, Türen, Abschottungen sowie Dieselmotorzuluftöffnungen bzw. -abgasöffnungen eindringen. Nachstehend folgt eine Diskussion über der Relevanz dieser Öffnungen.

Lüftungsöffnungen

Bei einem potenziellen Eindringen standortspezifisch zu unterstellender giftiger Gase werden Zu- und Abluftöffnungen sowie Ventilatoren für die Lüftungssysteme in Schaltanlagegebäude, Reaktor-Hilfsanlagengebäude, Reaktorgebäude, Notspeisegebäude, Notstromerzeugergebäude und Kaltwasserzentrale sowie Notnebenkühlwasser-Pumpenbauwerk von der Warte geschlossen bzw. abgeschaltet. Die Auslösung der Lüftungstechnischen Anlagen in den Nebenkühlwasser-Pumpenbauwerken erfolgt von Hand an den örtlichen Steuerstellen vor Ort.

Durch die zuständige Behörde oder durch das Gaswarnsystem für explosionsgefährliche Gase erfolgt die Gaswarnmeldung. Es sind mehrere Messstellen für die Gaswarnmeldung auf dem Kraftwerksgelände installiert, davon zwei in den Frischluft-Ansaugöffnungen des Reaktor-Hilfsanlagengebäudes und des Notspeisegebäudes.

Durch Umluftbetrieb erfolgt, falls notwendig, die Abfuhr der Verlustwärme von benötigten Sicherheitseinrichtungen für die Zeit der Gaswarnmeldung. Diese Auslegung gilt für

das Reaktor-Hilfsanlagegebäude, Reaktorgebäude, Schaltanlagegebäude, Notspeisegebäude, Nebenkühlwasser-Entnahmepumpenwerke, Notnebenkühlwasser-Pumpenbauwerk und die Nebenkühlwasser-Kühlturmpumpenbauwerke. Die Lüftung in der Frischdampf- und Speisewasserarmaturenkammer wird ständig in Umluftbetrieb gefahren.

Um das Eindringen ungefilterter kontaminierter Außenluft im Warten- und Rechnerbereich zu verhindern, wird ein Filtermobil gemäß Notfallhandbuch bei Aktivität in der Kraftwerksumgebung in Betrieb genommen. Im Anforderungsfall wird das Filtermobil an die dann im reinen Umluftbetrieb arbeitende Klimaanlage angeschlossen.

Tab. 3-3 gibt eine Übersicht der gegen „Ansaugen explosionsfähiger Gase“ (AEG) ausgelegten Gebäude.

Schleusen

In der Referenzanlage sind folgende relevante Schleusen vorhanden:

- **Materialschleuse (ca. 3 m x 3 m)**
Am Reaktorgebäude ist die Materialschleusenumbauung mit dem Halbportalgerüst angeordnet. Die Materialschleusenumbauung ermöglicht eine direkte Öffnung zwischen der Atmosphäre und dem Innenraum des Sicherheitsbehälters (SHB). Die Türen der Materialschleuse sind gegeneinander verriegelt, wobei die Möglichkeit der Überbrückung der Verriegelung besteht. Nach Aussagen verschiedener Betriebsvertreter wird die Überbrückung der Verriegelung nur in sehr seltenen Fällen während der Revision genutzt, da die Schleuse für alle üblichen Materialtransporte ausreichend dimensioniert ist. In der KTA 3601 „Lüftungstechnische Anlagen in Kernkraftwerken“ wird für die Druckdifferenz zwischen den großen Anlagenräumen des SHB und der Außenatmosphäre ein Orientierungswert von 2,5 mbar angegeben.
- **Personenschleuse (ca. 1 m x 2 m)**
Der Personenschleuse aus dem SHB führt in das Hilfsanlagegebäude, welches nicht gegen EDW, aber gegen AEG ausgelegt ist. Allerdings befindet sich die Personenschleuse sehr zentral im Hilfsanlagegebäude, so dass EDW-bedingte Zerstörungen an dieser Stelle kaum zu erwarten sind. Während des Leistungsbetriebs ist die Schleuse in Betrieb. Bei abgeschaltetem, drucklosem Reaktor wird die Verriegelung der Personenschleuse auf Grund des hohen Personenaufkommens aufgehoben, sodass beide Türen der Schleuse offenstehen.

- Zwei Notschleusen (innerer Durchmesser ca. 1,5 m)
Die beiden Notschleusen aus dem Sicherheitsbehälter stellen eine Öffnung zwischen Sicherheitsbehälter und den Ringraum dar und sind deshalb kein potenzieller Eingangspfad für gefährliche Gase.
- Einfahrtsschleuse
An einer Seite des Reaktor-Hilfsanlagengebäudes befindet sich die Einfahrtsschleuse. Dadurch können Materialtransporte in die „heiße“ Werkstatt des Kontrollbereichs gelangen. Die Schleuse wird beidseitig durch mehrflügelige Tore verschlossen, die standardmäßig gegeneinander verriegelt sind. Die Verriegelung kann im Bedarfsfall aufgehoben werden, allerdings ist dies nur in sehr seltenen Fällen erforderlich.

Türen sowie Fluchtwege ins Freie

Folgende Türen sowie Fluchtwege ins Freie sind in den sicherheitstechnisch relevanten Gebäuden vorhanden:

- Reaktorgebäude
Zusätzlich zu den Aussagen unter Schleusen (oben) sind Flucht- bzw. Rettungswege aus dem Reaktorgebäude-Ringraum vorhanden. Über zwei gegenüberliegende Schleusen im Bereich der beiden Treppenträume des Ringraums sind Ausgänge direkt ins Freie angebaut. Die Schleusen dienen als Notausgänge aus dem Reaktorgebäude (Kontrollbereich) ins Freie.
- Reaktor-Hilfsanlagengebäude
Neben der Einfahrtsschleuse (siehe Schleusen) gibt eine weitere Zugangstür für den Personenverkehr im Reaktor-Hilfsanlagengebäude. Rettungswege ins Freie führen über die Treppenträume des Reaktorgebäudes bzw. den Treppenraum an der dem Schaltanlagengebäude zugewandten Seite.
- Notstromerzeugergebäude und Kaltwasserzentrale
Jeder der vier Redundanzbereiche ist durch zwei Außentüren zugänglich.
- Schaltanlagengebäude
Der Zugang zum Schaltanlagengebäude erfolgt über das Büro- und Sozialgebäude. Außerdem sind zwei Rettungswege in die beiden vorgelagerten Treppenträume mit direktem Ausgang ins Freie vorhanden.

- Notspeisegebäude
Den Personenzugang erfolgt entweder durch die Materialeinfahrt oder durch den Personeneingang auf der anderen Gebäudelängsseite.
- Notnebenkühlwasser-Entnahmebauwerk
Das Bauwerk wird nur zu Kontroll- und Reparaturzwecken betreten. Ein Fluchtweg steht über eine Luke direkt ins Freie zur Verfügung. Weiterhin sind auf der Bauwerksdecke Einstiegs- und Montageöffnungen vorhanden. Diese sind durch massive Stahlbetonplatten abgedeckt, welche mit einem Mobilkran bewegt werden können.
- Notnebenkühlwasser-Pumpenbauwerk
Das Bauwerk wird nur zu Kontroll- und Reparaturzwecken betreten. Der Fluchtweg aus dem Bauwerk führt über zwei Treppenträume und durch den Bedienungsraum ins Freie.

Dieselmotorzuluftöffnungen und -abgasöffnungen

In Notstromerzeugergebäude und Notspeisegebäude sind Zuluft- und Abgasöffnungen für die Dieselaggregate vorhanden. Da in den Abgasstrang hinein keine freie Strömung stattfinden kann und keine Druckdifferenzen herrschen, wird die Möglichkeit des Eindringens gefährlicher Gase über die Abgasöffnungen als wenig relevant angesehen.

Die Zuluftversorgung der Notstandsdieselmotoren erfolgt über eigene Kanäle, die zu zwei Gebäudeseiten hin geöffnet sind. In den Kanälen sind Brandschutzklappen angeordnet, die im Falle z. B. eines Kerosinbrands auf einer Gebäudeseite selbstständig durch die Auslösung eines Schmelzlots bei einer Standardauslösetemperatur (Schmelztemperatur) von 72°C schließen. Die Zuluftversorgung der Notstandsdieselmotoren erfolgt dann über die andere Gebäudeseite. Es wird dabei davon ausgegangen, dass ein potentieller Brand nur auf einer Seite zu einer Beeinträchtigung der Zuluftqualität führt und dass diese Beeinträchtigung über die thermischen Auswirkungen automatisch zur Auslösung der Brandschutzklappen führt.

Sonstige Öffnungen

Insbesondere während Betriebsphasen des Nichtleistungsbetriebs können Öffnungen jeglicher Art, z. B. Abschottungen, repariert, ausgetaucht oder begangen werden. In so

einem Fall kann die jeweilige Öffnung möglicherweise nur zeitverzögert wieder verschlossen werden.

3.2 Umsetzung am Beispiel eines Kernkraftwerks mit Siedewasserreaktor

Die Umsetzung der Regelwerksanforderungen in Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktor (SWR) wurde am Beispiel einer SWR-Referenzanlage der Baulinie SWR-69 untersucht. Die nachfolgenden Abschnitte beziehen sich immer auf die Umsetzung in dieser Referenzanlage.

3.2.1 Explosionsdruckwelle

Der Auslegung gegen Explosionsdruckwelle bei der Referenzanlagen entspricht für die zu schützenden Gebäude der Druckwellenrichtlinie /BMI 76/ (siehe Abschnitt 2.2).

Tab. 3-3: Gebäude und Anlagenbereiche die gegen Explosionsdruckwelle (EDW) bzw. Ansaugen explosionsfähiger Gase (AEG) ausgelegt sind.

Gebäude / Anlagenbereich	Anforderung	
	EDW	AEG
Reaktorgebäude	Die Mindesttraglast der Außenwände liegt nahe der Auslegungslast für die Druckwelle. Die Schutzwirkung der vorgelagerten Gebäude ist dabei nicht berücksichtigt.	X
Maschinenhaus		X
Betriebs-, Warten- und Schaltanlagengebäude	Die Druckwelle ist durch die räumliche bzw. auslegungsgemäße Redundanz der Bauwerke abgedeckt.	X
Nebenkühlwasserpumpenhaus		
Notstromdieselgebäude		X
Notstandsgebäude	Der dynamische Druck einer ankommenden Welle von 1,3 bar und ein dynamischer Reflexionsdruck	X

Gebäude / Anlagenbereich	Anforderung	
	EDW	AEG
	<p>von 1,45 bar wurden berücksichtigt.</p> <p>Explosionsschutzklappen für den Außenlufteintritt und Fortluftaustritt schließen selbsttätig beim Auflaufen einer Explosionsdruckwelle. Außerdem ist der gebunkerte Außenluftkanal auf dem Dach viermal um 90 ° abgewinkelt, um die Energie eventuell eindringender Druckwellen abzubauen.</p>	
Notstandsgebäude - Pumpenbauwerk / Zusätzliche Wasserversorgung	<p>Der dynamische Druck einer ankommenden Welle von 1,3 bar und ein dynamischer Reflexionsdruck von 1,45 bar wurden berücksichtigt.</p> <p>Daneben wird die Explosionsdruckwelle durch die zusätzliche Wasserversorgung beherrscht.</p>	
Gebunkerte Nebenkühlwasserleitungen	Die Leitungen sind durch entsprechende Verlegungstiefe und Abstand zu den anderen Nebenkühlwasserleitungen geschützt.	

3.2.2 Eindringen standortspezifisch zu unterstellender gefährlicher Gase

Standortspezifisch zu unterstellende giftige oder explosionsfähige Gase können in sicherheitsrelevanten Gebäuden durch offene Lüftungsöffnungen, Schleusen, Türen, Abschottungen sowie Dieselmotorzuluftöffnungen und -abgasöffnungen eindringen. Nachstehend folgt eine Diskussion über die Relevanz dieser Öffnungen.

Lüftungsöffnungen

Eine Gaswarnanlage überwacht die Atmosphäre um die Kraftwerksanlage auf das Vorhandensein gefährlicher Gase. Bei einer Meldung der Gaswarnanlage kann von der Hauptwarte die Abschaltung von Ventilatoren bzw. das Schließen von Absperrklappen in den Außenluft- und Zuluftanlagen sowie Abluft- und Fortluftanlagen der betroffenen Lüftungssysteme des Reaktorgebäudes, des Maschinenhauses, des BWS-Gebäudes, des Notstandsgebäudes und des Dieselgebäudes (siehe auch Tab. 3-3) erfolgen. Ein automatischer Lüftungsabschluss für die oben genannten Gebäude, mit Ausnahme des Maschinenhauses ist vorgesehen, sobald die Installation von Rauchsaugsystemen in den Außenluftkanälen bzw. Zuluftkanälen der Lüftungsanlagen erfolgt ist (dies ist

zum Teil bereits erfolgt). Folgende Maßnahmen sind spezifisch für das Reaktorgebäude und das BWS-Gebäude vorgesehen:

- Reaktorgebäude
Für das Reaktorgebäude wird über die nukleare Lüftungsanlage belüftet. Falls eine Meldung über explosionsfähige Gase an einer Messstelle an der Zuluftöffnung auftritt, können alle Jalousieklappen luftdicht verschlossen werden.
- BWS-Gebäude
Beim BWS-Gebäude wird bei einer Gefährdung durch Eindringen explosionsfähiger Gase die Lüftung auf Umluftbetrieb geschaltet. Der Abschluss der Zuluft zum BWS-Gebäude erfolgt durch Schließen von Zuluftklappen, der Zuluftregelklappen und Abschalten der Zuluftventilatoren. Weiterhin werden die Zuluftklappen zu den Schaltanlagen, die Zuluftklappen zur Warte sowie die Zuluftklappen zu den Batterieräumen geschlossen. Darüber hinaus werden die Abluftventilatoren des Kontrollbereichs wie die Laborabzüge abgeschaltet. Zusätzlich werden die Abluftventilatoren der Batterieräume und des Kältemaschinenraumes außer Betrieb genommen und die Warte auf Umluftbetrieb umgeschaltet.

Schleusen

Für den Zutritt zum Sicherheitsbehälter sind zwei Schleusen (Personen- und Nebenschleuse) vorhanden, außerdem sind drei weitere kreisrunde Montageöffnungen zu Montagezwecken vorgesehen. Die Schleusen und Montageöffnungen werden allerdings nicht ins Freie geöffnet, sondern innerhalb des Reaktorgebäudes.

Türen sowie Fluchtwege ins Freie

Folgende Türen sowie Fluchtwege ins Freie sind in den sicherheitstechnisch relevanten Gebäuden vorhanden:

- Reaktorgebäude
Das Reaktorgebäude hat keine Türen oder Fluchtwege ins Freie. Der Zugang zum Gebäude erfolgt über die Kontrollbereichseingänge im BWS-Gebäude oder in der Werkstatt-Lager-Erweiterung entlang der Gleisdurchfahrt durch das Feststofflager.
- Betriebs-, Warten- und Schaltanlagegebäude (BWS-Gebäude)
In drei Treppenhäusern an zwei Seiten des BWS-Gebäudes sind Ausgänge ins Freie vorhanden.

- **Notstromdieselgebäude**
Sämtliche Räume (4 x Dieselaggregateräume und Schaltanlagenräume) haben einen direkten Ausgang ins Freie
- **Kühlwasserpumpenhaus**
Die Nebenkühlwasserpumpen befinden sich im Kellergeschoss des Kühlwasserpumpenhauses und sind als sicherheitstechnisch relevant eingestuft. In dem Pumpenhaus sind zwei Treppenhäuser mit Ausgängen ins Freie vorhanden.
- **Notstandsgebäude**
Eines der beiden Treppenhäuser hat einen Ausgang direkt ins Freie.
- **Notnebenkühlwasser-Pumpenbauwerk**
Ein Ausgang durch das Treppenhaus ist im Notnebenkühlwasser-Pumpenbauwerk vorhanden.
- **Brunnen**
Ein Treppenhaus mit einem Ausgang direkt ins Freie ist vorhanden.

Dieselmotorzuluftöffnungen und –abgasöffnungen

Im Notstandsgebäude sind jedem Dieselaggregat eine Ansaugung der Verbrennungsluft mit entsprechenden Lüftungsgeräten zugeordnet.

Sonstige Öffnungen

Hier gelten die gleichen Aussagen wie für eine Referenzanlage von Typ Konvoi-DWR (vgl. Abschnitt 3.1.2).

4 Robustheitsbetrachtungen

4.1 Robustheit der Auslegung gegen Explosionsdruckwellen

Bei Druckwellen aus chemischen Explosionen handelt es sich um sehr seltene Einwirkungen auf Kernkraftwerke, für die es national wie international keine Betriebserfahrung gibt. Eine grundlegende Überprüfung der Auslegung, wie sie im damaligen RSK-Unterausschuss „Chemische Explosionen“ Anfang der 1970er Jahre festgelegt wurde, ist innerhalb dieses Vorhabens nicht möglich. Stattdessen werden im Folgenden die in der Druckwellenrichtlinie /BMI 76/ beschriebenen Einwirkungen mit Modellen nach dem heutigen Stand der Technik verglichen.

Bautechnische Unterlagen zum Nachweis des Widerstands deutscher Kernkraftwerke gegen Einwirkungen aus chemischen Explosionen liegen der GRS nicht vor. Innerhalb der anlagenspezifischen Sicherheitsüberprüfung für die deutschen Kernkraftwerke nach den Reaktorunfällen von Fukushima Dai-ichi, der so genannten RSK-SÜ /RSK 11/, konnte für alle derzeit noch im kommerziellen Betrieb befindlichen deutschen Kernkraftwerke aufgezeigt werden, dass die Auslegung gemäß Druckwellenrichtlinie /BMI 76/ erfüllt ist.

Der Lastfall Explosionsdruckwelle wird im höherfrequenten Bereich im Allgemeinen durch den Lastfall Flugzeugabsturz abgedeckt. Im niederfrequenten Bereich erfolgt je nach Standort eine Abdeckung durch den Lastfall Bemessungserdbeben /BER 01/, /KIR 10/. Der Lastfall Explosionsdruckwelle ist somit häufig nicht bestimmend für die bautechnische Auslegung der Gebäude und der zu berücksichtigenden induzierten Schwingungen an sicherheitstechnisch wichtigen Systemen.

4.1.1 Vergleich des Maximaldrucks nach Druckwellenrichtlinie mit dem Modell der TNO

In der Druckwellenrichtlinie /BMI 76/ wird als Basisauslegung für zu schützende Gebäude in Kernkraftwerken von einem Spitzenüberdruck von 0,3 bar bzw. 0,45 bar unter Berücksichtigung der reflektierten Welle ausgegangen (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Das TNO-Modell ist in /MUS 89/ und /ACI 00/ dargestellt. Mit dem Modell lässt sich der maximale Spitzenüberdruck einer Gaswolkenexplosion in Abhängigkeit des explosions-

fähigen Gasvolumens, des Abstands zwischen Gaswolke und Bauteil und der Reaktivität der Gasgemische abschätzen.

Der höchste, mit dem TNO-Modell abschätzbare Spitzendruck wird erreicht, wenn der Abstand zwischen Gaswolkenmittelpunkt und Bauteil genau der Ausbreitung der Verbrennungsschwaden nach der Explosion entspricht. In diesem Fall ist der maximale Spitzenüberdruck unabhängig vom Wolkenvolumen und nur abhängig von der Reaktionsfähigkeit des Gasgemisches. Für Gase mit hoher Reaktionsfähigkeit (Acetylen und Ethylenoxid, angesetzte Flammengeschwindigkeit von 160 m/s) berechnet sich nach /ACI 00/ ein maximaler Spitzenüberdruck von 0,314 bar. Für Gase mit mittlerer Reaktionsfähigkeit, wie die meisten Kohlenwasserstoffe (angesetzte Flammengeschwindigkeit von 80 m/s), beträgt der maximale Spitzenüberdruck 0,126 bar. Ein Zuschlag für reflektierte Wellen wird in diesem Modell nicht berücksichtigt.

Der Vergleich mit der Auslegung nach Druckwellenrichtlinie /BMI 76/ mit einem Spitzenüberdruck von 0,45 bar zeigt, dass die Auslegung konservativ ist. Bezogen auf Gase mit hoher Reaktionsfähigkeit (Spitzenüberdruck 0,314 bar) besteht kein Sicherheitsabstand mehr zum Überdruck der unreflektierten Welle von 0,3 bar. Allerdings gilt für das im TNO-Modell /ACI 00/ mit der höchsten Reaktivität aufgeführte Gas Acetylen aufgrund seiner C-zweifach-Bindung die Sonderregelung innerhalb der Druckwellenrichtlinie /BMI 76/, dass unabhängig von der Lagerungsart die volle Lagermenge von Acetylen zur Bestimmung des Abstands anzusetzen ist.

4.1.2 Vergleich der Massen-Abstand-Beziehung nach Druckwellenrichtlinie mit TNT-Vergleichsmodell

In der Druckwellenrichtlinie des BMI /BMI 76/ gilt für den Umgang mit explosionsfähigen Stoffen die Massen-Abstands-Beziehung (vgl. Abschnitt 2.2.2)

$$R = 8 L^{1/3}$$

mit R Sicherheitsabstand in m,

L die zu Grunde zu legende Masse des explosionsfähigen Stoffes in kg.

Für explosionsgefährliche Sprengstoffe ist die Masse L als TNT-Äquivalent einzusetzen. Insofern bietet sich der Vergleich der Auslegung mit einem TNT-Vergleichsmodell

an. In einem TNT-Vergleichsmodell wird der Spitzenüberdruck einer Explosion über den sogenannten skalierten Abstand („scaled distance r“) aufgetragen (Abb. 4-1). Der skalierte Abstand (Einheit $\text{m/kg}^{1/3}$) ist das Verhältnis aus dem Abstand von der Explosion zur dritten Wurzel der an der Explosion beteiligten Masse, ausgedrückt als TNT-Äquivalent. Bei den TNT-Vergleichsmodellen wird davon ausgegangen, dass innerhalb des gleichen skalierten Abstands die gleichen Spitzenüberdrücke auftreten und das sich eine deflagrativ abbrennende Gaswolke hinsichtlich des Spitzenüberdrucks genauso verhält wie eine detonativ verlaufende (Sprengstoff-)Explosion. Die Massen-Abstands-Beziehung nach BMI-Richtlinie lässt sich auch als eine Anforderung verstehen, den minimalen skalierten Abstand von $8 \text{ m/kg}_{\text{TNT}}^{1/3}$ einzuhalten.

In der neueren Standardliteratur /ACI 00/, /BOS 05/ werden verschiedene grafische Relationen als TNT-Vergleichsmodell dargestellt, wobei das Modell des Yellow Books /BOS 05/ für einen gegebenen skalierten Abstand zu einem höheren Spitzenüberdruck führt. Der nach der BMI-Richtlinie geforderte skalierte Abstand von $8 \text{ m/kg}_{\text{TNT}}^{1/3}$ führt zu einem Überdruck von 0,21 bar am zu schützenden Gebäude (siehe Abb. 2-1). Das in /ACI 00/ und /MUS 91/ wiedergegebene TNT-Vergleichsmodell, bei dem der Kurvenverlauf gegenüber der Abb. 4-1 parallel verschoben ist, führt bei demselben skalierten Abstand nur zu einem Überdruck von 0,14 bar. Im Zusammenhang mit den TNT-Vergleichsmodellen wird kein Überhöhungsfaktor für eine reflektierte Welle verwendet. Der Vergleich der Modellergebnisse mit der Basisauslegung nach BMI-Richtlinie von 0,3 bar bzw. 0,45 bar Spitzenüberdruck zeigt, dass die Massen-Abstands-Beziehung für die Explosion von Sprengstoffen nach dem heutigen Leitfäden zu konservativen Ergebnissen führt.

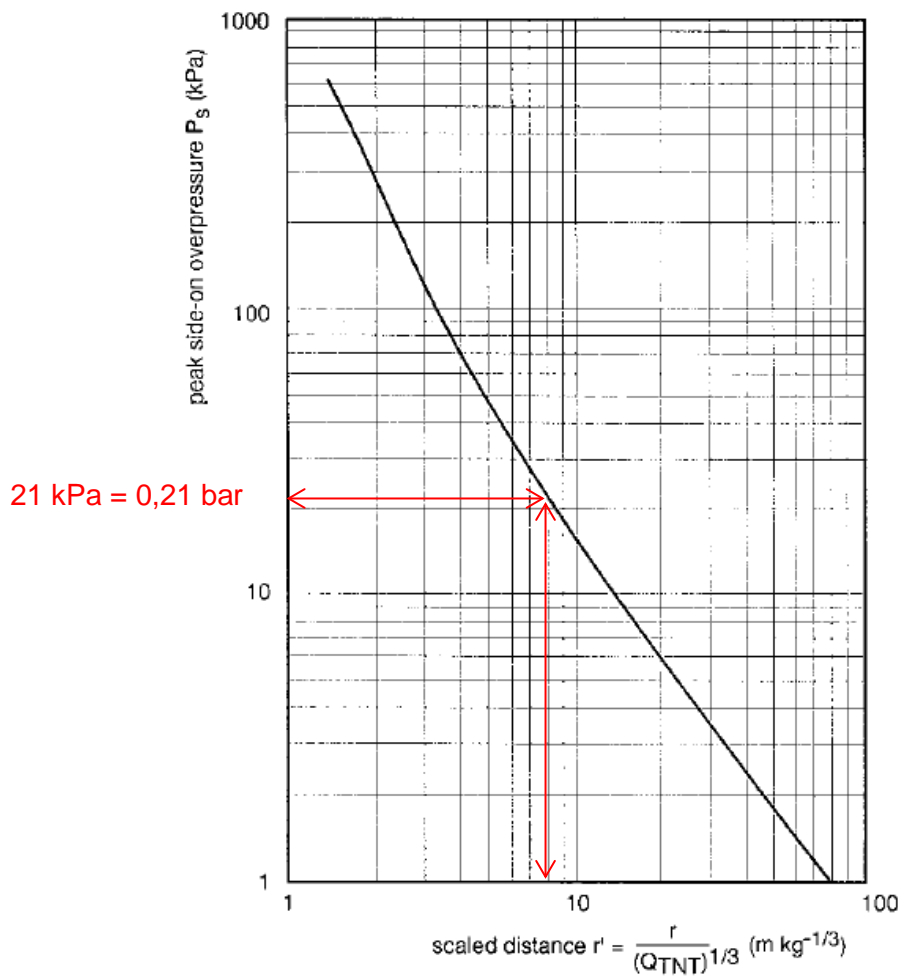


Abb. 4-1: TNT-Vergleichsmodell in der im Yellow-Book /BOS 05/ dargestellten Form

Bezogen auf die Explosion von Gasen und Dämpfen sind allerdings noch weitere Faktoren zu berücksichtigen. Gemäß BMI-Richtlinie ist die zu Grunde zu legende Masse L bei brennbaren Gasen und Flüssigkeiten in Abhängigkeit des Lagerzustands festzulegen (vgl. Kap. 2.2.2). Hierdurch wird berücksichtigt, dass im Falle von unfallbedingten Freisetzungen nur eine Teilmenge der brennbaren Gase oder Flüssigkeiten in die Gasphase übergeht. Diese in der Druckwellenrichtlinie /BMI 76/ unter Abschnitt 4c genannten Anteile sind im Rahmen diese Vorhabens nicht überprüft worden. Außer der Berücksichtigung des Lagerzustands sieht die Druckwellenrichtlinie zur Bestimmung der zu Grunde zu legenden Masse L bei brennbaren Gasen und Flüssigkeiten keine weiteren Faktoren vor, d. h. für die Festlegung des Mindestabstands werden die unfallbedingt freisetzbaren Massen von brennbaren Gasen oder Dämpfen gleichgesetzt mit der Masse von TNT-Sprengstoff.

Innerhalb des TNT-Vergleichsmodells werden für verschiedene Gase und Dämpfe in der Literatur allerdings TNT-Äquivalente θ und Umsetzungsgrade η angegeben. Das TNT-Äquivalent θ berücksichtigt die unterschiedlichen Reaktionsenthalpien der betrachteten Gase und Dämpfe im Vergleich zur Reaktionsenthalpie von TNT, welche ca. $\Delta h_{c,TNT} = 4500 \text{ kJ/kg}$ beträgt. Der Umsetzungsgrad η berücksichtigt, dass freigesetzte Gase und Dämpfe nur zu einem geringen Teil in der Gemischwolke reagieren. Aus dem Produkt von TNT-Äquivalent und Umsetzungsgrad errechnet sich der massenspezifische Äquivalenzfaktor α_m . In Tab. 4-1 sind vorgenannte Kennwerte für einige häufiger verwendete Kohlenwasserstoffe genannt. Falls der massenspezifische Äquivalenzfaktor größer als 1 ist, geht von den Stoffen bei gleicher Masse eine höhere Explosionsheftigkeit aus als von TNT. Mit etwas oberhalb von zwei weist Acetylen den höchsten massenspezifischen Äquivalenzfaktor auf. Dabei fällt Acetylen auf Grund der C-dreifach-Bindung unter die Sonderregelung der Druckwellenrichtlinie /BMI 76/ (Abschnitt 4 Buchstabe b), wonach die Gesamtmasse ohne Berücksichtigung von Freisetzungprozessen anzusetzen ist. Ferner geht der Faktor α_m nur in der dritten Wurzel in den skalierten Abstand des TNT-Vergleichsmodells ein, so dass im Modellergebnis die Unterschätzung des Spitzenüberdrucks nur geringfügig ist.

Tab. 4-1: Verbrennungsenthalpie Δh_c , resultierender TNT-Äquivalenzfaktor θ , Umsetzungsgrad η und resultierender massenspezifische Äquivalenzfaktor α_m für häufig auftretende Gase und Dämpfe /NEN 02/, /ACI 00/

Brennbares Gas oder Dampf	Δh_c [MJ/kg]	θ [-]	η [-]	α_m [-]
Aceton	28,56	6,3	0,03	0,19
Butadien	45,51	10,1	0,03	0,30
Propan	46,36	10,3	0,03	0,31
Cyclohexan	43,45	9,7	0,06	0,58
Ethylen (Ethen)	47,17	10,5	0,06	0,63
Propylenoxid	33,35	7,4	0,06	0,44
Acetylen	48,22	10,7	0,19	2,04
Ethylenoxid	27,65	6,1	0,19	1,17

Wie bereits ausgeführt, sind die gemäß Druckwellenrichtlinie gemachten Annahmen zur Festlegung der zu Grunde zu legenden Masse L (vgl. Kap. 2.2.2) nicht einzeln überprüft worden, da die Abhängigkeit der Verdampfungsanteile vom Lagerzustand insgesamt plausibel ist. Hierbei wurde allerdings immer von einer freien Verdampfung der Gefahrstoffe ausgegangen.

Anders verhält es sich bei der Gasexplosion einer expandierenden siedenden Flüssigkeit, im Englischen boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) genannt. Diese entsteht durch die Unterfeuerung eines havarierten Tanks mit einem brennbaren, druckverflüssigten Gas oder Flüssigkeit. Der Druckanstieg im Tank führt zunächst zum Austritt des Mediums aus dem Sicherheitsventil. Durch die abnehmende Medienmasse kann die Wärmeenergie des Feuers nicht mehr aufgenommen werden, so dass es zu einem zu einem schnelleren Temperatur- und Druckanstieg im Tank kommt, der schließlich zum Behälterbersten führen kann. Im Fall eines BLEVE ist die Gesamtmasse eines bzw. mehrerer Tanks involviert. Bzgl. der Explosionswirkung ist aber zu berücksichtigen, dass auf Grund des Ablaufs des BLEVE das gesamte Inventar nicht gleichzeitig reagiert und dass die beim Bersten austretende siedende Flüssigkeit für eine schnelle Explosion nicht optimal verteilt ist. Deshalb sind bezüglich der Abschätzung der Explosionswirkung weitere Abschlüsse zu machen. Detailliertere Recherchen wurden im Rahmen dieses Vorhabens nicht durchgeführt.

4.2 Robustheit der Auslegung gegen gefährliche luftgetragene Stoffe

Aufgrund der Vielzahl luftgetragener Stoffe und der verschiedenen kurzfristigen oder längerfristigen Schadwirkungen auf Personen oder sicherheitstechnisch wichtiger Anlagenteile lässt sich die Robustheit der Auslegung nur exemplarisch diskutieren. Als Beispiele für Einwirkungen über die Lüftungssysteme werden hier

- Gefahrstoffe, die die Handlungsfähigkeit des Personals herabsetzen können,
- korrosive Gefahrstoffe und
- explosionsfähige Atmosphäre

diskutiert.

4.2.1 Gefahrstoffe, die die Handlungsfähigkeit des Personals herabsetzen können

Die Handlungsfähigkeit des Kraftwerkspersonals herabsetzen können solche Stoffe, die die Gefährlichkeitsmerkmale „sehr giftig“, „giftig“, „gesundheitsschädlich“, „ätzend“ oder „reizend“ nach Gefahrstoffverordnung /GEF 13/ erfüllen. Aufgrund des großen Spektrums möglicher unfallbedingt auftretender Stoffe und der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit sind die meisten Kernkraftwerke in Deutschland nicht mit einer automatischen Detektionseinrichtung für Stoffe mit diesen Gefährlichkeitsmerkmalen ausgestattet. Der Hinweis auf die Freisetzung der Stoffe würde deshalb durch zuständige Polizei-, Umwelt- oder Schifffahrtsbehörden oder durch die Betreiber benachbarter Anlagen erfolgen. Ferner ist der größte Teil der betreffenden Schadstoffe mit dem Geruchssinn wahrnehmbar. Nach einem Anfangsverdacht kann das Auftreten vieler möglicher Schadstoffe durch die Werkfeuerwehr, z. B. mittels Prüfröhrchen, halbquantitativ nachgewiesen werden.

Nachdem eine stoffliche Einwirkung von außen erkannt worden ist, können die Lüftungsanlagen des Kontrollbereichs, des Schaltanlagegebäudes und des Notspeisegebäudes durch die Warte nach außen abgesperrt und in den Umluftbetrieb genommen werden.

Falls die stoffliche Einwirkung von außen nicht erkannt würde, oder falls der Lüftungsabschluss nicht erfolgt, kommt es zu einer Anreicherung von Schadstoffen in den Anlagenräumen. Falls die Lüftungsanlage vollständig im Fortluftbetrieb gefahren wird (Umluftanteil ist Null), ist bei einer angenommenen optimalen Durchmischung der Konzentrationsverlauf eines Schadstoffs $c_s(t)$ in einem Anlagenraum abhängig von der Außenluftkonzentration c_A und der Luftwechselzahl (LWZ) des Anlagenraums

$$c_s(t) = c_A * (1 - e^{-(LWZ * t)})$$

Laut /HOS 96/ beträgt der maschinelle Luftwechsel in Räumen von Kernkraftwerken ca. 1000 bis 2000 m³/h pro 50 m² Raumfläche. Bei geschätzt 4 m lichter Raumhöhe ergibt sich eine Luftwechselzahl von 5 bis 10 pro Stunde. Zum Vergleich wurde für französische kerntechnische Anlagen in /LES 08/ ein Luftwechsel im Bereich von 1,5 bis 8,4 h⁻¹ genannt. In Abb. 4-2 ist die Anreicherung von Schadstoffen in Anlagenräumen in Abhängigkeit der Luftwechselzahl dargestellt. Beispielsweise ist bei einer LWZ

von 10 pro Stunde nach 240 Sekunden im Anlagenraum die Hälfte der Außenluftkonzentration c_A erreicht.

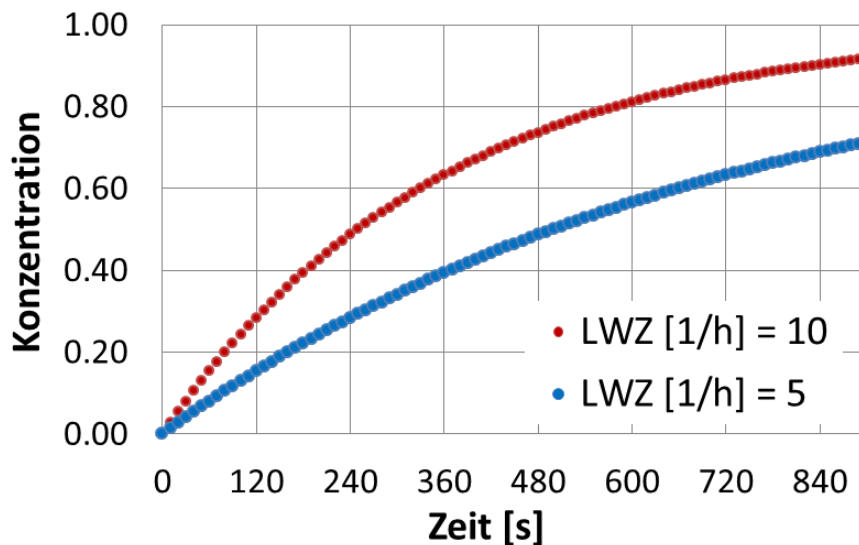


Abb. 4-2: Anreicherung von Stoffen in Anlagenräumen in Abhängigkeit der Luftwechselzahl

Aufgrund der Vielzahl möglicher Freisetzungsszenarien, daran beteiligter Stoffe, Reaktionen des Anlagenpersonals und weiterer veränderlicher Randbedingungen wird im Folgenden beispielhaft ein Brandszenario auf dem Anlagengelände betrachtet. Dieses Beispiel wurde gewählt, weil in der deutschen Betriebserfahrung ein ähnliches Szenario aufgetreten ist. Allerdings werden im Rechenbeispiel die Parameter frei gewählt.

Es wird davon ausgegangen, dass unterhalb der Zuluftöffnungen eines sicherheitstechnisch wichtigen Gebäudes Lagergut in Brand gerät. Hierdurch werden als toxisch relevante Gase große Mengen Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO₂) produziert. Der an der Zuluftöffnung vorbeistreifende Feuerplume habe eine als konstant angenommene Volumenkonzentration von $c_{A,CO} = 0,15\%$ (1500 ppm), $c_{A,CO_2} = 3\%$ und einen um $c_{A,red,O_2} = 4,5\%$ reduzierten Sauerstoffanteil. Diese Annahmen sind bezüglich der Rauchkonzentrationen und des CO/CO₂-Verhältnisses konservativ. Es wird davon ausgegangen, dass keine weiteren relevanten Schadgase im Brandrauch auftreten.

Wenn von einem Versagen des Lüftungsabschlusses des Gebäudes sowie einem Umluftanteil von Null ausgegangen wird und Löschmaßnahmen hier nicht berücksichtigt werden, erfolgt die Anreicherung der Brandgase am Beispiel von Kohlenmonoxid in der

Anlagenräumen entsprechend der Abb. 4-3. Die Schadwirkung aus der Einwirkung verschiedener Brandgase lässt sich mit dem Fractional Effective Dose (FED)-Modell nach Purser abschätzen /PUR 02/, /FOR 10/. Dabei wird die Stickwirkung aus der CO-Dosis und der reduzierten Sauerstoffkonzentration berücksichtigt. Ferner führt der Anteil an CO₂ zu einer erhöhten Aufnahme der Schadgase auf Grund von einsetzender Hyperventilation. Die dimensionslose Fractional Effective Dose ist so definiert, dass bei einem Wert von 1,0 ein Anteil von 50 % der Durchschnittsbevölkerung handlungsunfähig, d. h. bewusstlos wird. Für die Berechnung wird von einem Atemminutenvolumen von 25 l/min ausgegangen, was einer „leichten Aktivität“ entspricht. Ferner wird von einer Grenzkonzentration von 30 % Kohlenstoffmonoxid-Hämoglobin im Blut bis zum Eintritt der Bewusstlosigkeit ausgegangen.

Bei dem beschriebenen konservativen Szenario tritt nach 1010 s (ca. 17 min) mit einem FED-Wert von 1,0 für die Durchschnittsbevölkerung die Handlungsunfähigkeit ein (vgl. Abb. 4-4). Für eine genauere Analyse ist zu berücksichtigen, dass auch unterhalb von $FED \geq 1$ eine Handlungsbeeinträchtigung auftritt. Ferner wurde hier nicht berücksichtigt, dass im Ereignisfall die Möglichkeit besteht, dass das Personal persönliche Atemschutzausrüstung anlegt.

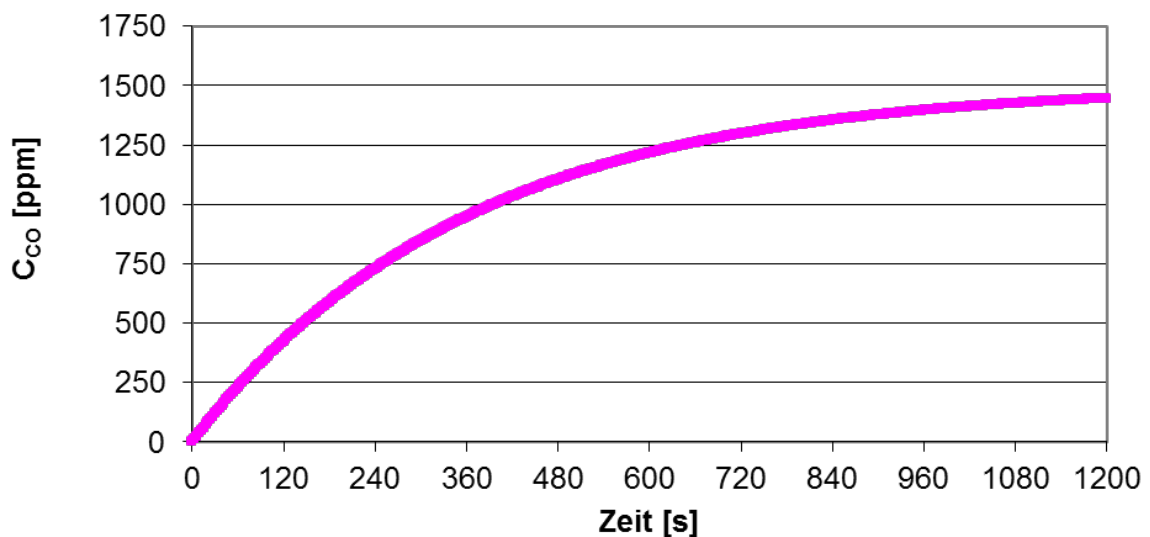


Abb. 4-3: Anreicherung von Kohlenmonoxid in Anlagenräumen bei einer Außenkonzentration von $c_{A,CO} = 1500$ ppm und einem Luftwechsel von 10 h^{-1}

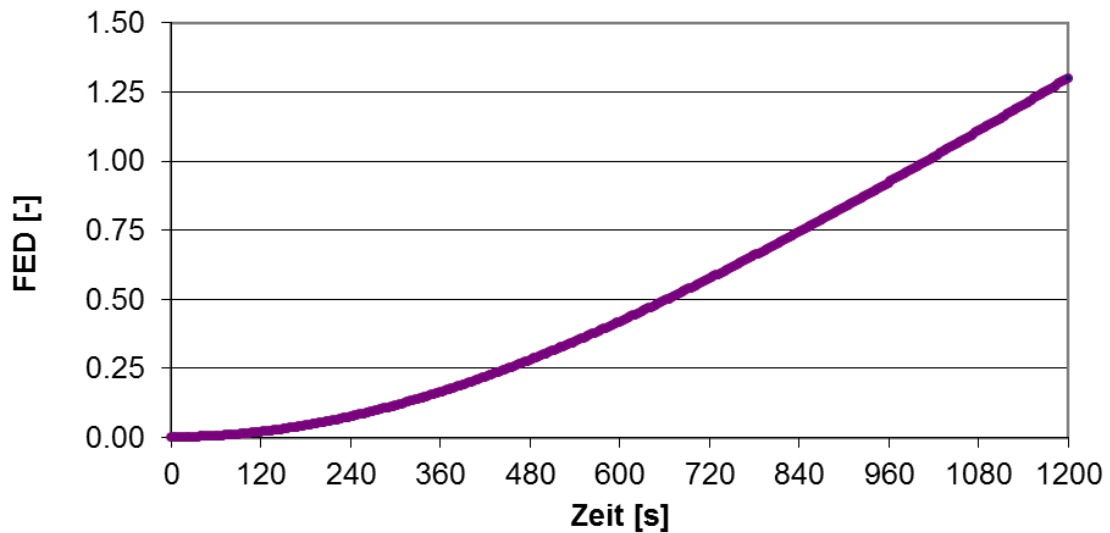


Abb. 4-4: Entwicklung der Fractional Effective Dose für in Anlagenräumen exponiertes Kraftwerkspersonal bei dem beschriebenen konservativen Szenario

Neben dem Brandszenario sind weitere, in Abhängigkeit der beteiligten Stoffe gefährlichere Szenarien nicht auszuschließen. Innerhalb der Sicherheitsüberprüfung der RSK wurde deshalb bzgl. der Einwirkung toxischer Gase auch auf das Auslegungsmerkmal der 10-Stunden-Autarkie verwiesen /RSK 11/.

4.2.2 Korrosive Gefahrstoffe

Korrosive Gefahrstoffe erfüllen nach Gefahrstoffverordnung /GEF 13/ das Gefährlichkeitsmerkmal „ätzend“; das Merkmal „reizend“ ist dagegen ein schwächeres Merkmal. Typische korrosive Transportgüter sind z. B. Chlor und Chlorverbindungen. Stoffe mit den Merkmalen „ätzend“ bzw. „reizend“ setzen, wie im vorigen Kapitel diskutiert, die Handlungsfähigkeit des Kraftwerkspersonals herab. Dazu können sie grundsätzlich zum Ausfall der Funktion sicherheitstechnisch wichtiger Anlagenteile führen.

Ausfälle von Anlagenteilen hängen ab von vielen Faktoren ab wie:

- der Art des Anlagenteils bzw. der Komponente,
- der Art des korrosiven Stoffs,
- der Konzentration und Expositionszeit,

- Ablagerungsmechanismen sowie
- den Randbedingungen wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur etc.

Als Schadwirkungen kommen vor allem Korrosionserscheinungen an austenitischen Komponenten in Betracht, die allerdings lange Entwicklungszeiträume aufweisen. Auf die lange Dauer bis zum Wirksamwerden einer stofflichen Einwirkung wurde seitens der Kraftwerksbetreiber auch innerhalb der RSK-Sicherheitsüberprüfung hingewiesen.

An elektrischen Bauteilen wurden allerdings schon innerhalb von Stunden nach Exposition nichtthermische Schäden durch korrosiven Brandrauch dokumentiert /PEA 12/. In der umfangreichen Literaturstudie /PEA 12/ zu Schadwirkungen auf elektrische Einrichtungen durch Brandrauch werden Korrelationen zwischen Schadenseintritt und Brandrauchkonzentration dargestellt, wobei der Brandrauch immer als Aerosol mit daran anhaftenden HCl-Anteilen auftritt. Da feste Brandrauchbestandteile zu einem gewissen Teil im Zuluftfilter abgeschieden werden, lassen sich die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf von außen eingetragenen Brandrauch übertragen.

Für ein Szenario der unfallbedingten Freisetzung von Dämpfen von hochkonzentrierter Salzsäure, wie es in /ACI 00/ beschrieben wird, fehlt in der Literatur eine Korrelation zur Schadwirkung. Falls in die Anlage eintretende Salzsäuredämpfe nicht auf Feuchtigkeit treffen und deshalb nicht in Lösung gehen, ist tendenziell von einem geringen Schädigungspotenzial auszugehen.

4.2.3 Explosionsfähige Atmosphäre

Neben brennbaren Gasen, die explosionsfähige Gas-Luft-Gemische bilden, können auch brennbare Flüssigkeiten brennbare Dampf-Luft-Gemische bilden, wenn der Dampfdruck der Flüssigkeit oberhalb der unteren Explosionsgrenze liegt. Hierzu wird der Flammpunkt als sicherheitstechnische Kenngröße verwendet. Definitionsgemäß ist der Flammpunkt (FP) die niedrigste Temperatur bezogen auf 101,3 kPa, bei der eine Flüssigkeit unter den Bedingungen des Prüfverfahrens Dämpfe in solchem Maße entwickelt, dass sich ein entzündbares Dampf/Luft-Gemisch bildet. Für Reinstoffe liegt der untere Explosionspunkt 2 bis 3 K niedriger als der Flammpunkt, bei Gemischen/Zubereitungen kann er bis zu 15 K unter dem Flammpunkt liegen /BRA 09/.

Stoffe, die mit Luft gefährliche explosionsfähige Atmosphäre bilden können, tragen die Gefährlichkeitsmerkmale „hochentzündlich“ (FP < 0 °C), „leichtentzündlich“ (0 °C < FP < 21 °C) bzw. mit Einschränkung „entzündlich“ (21 °C < FP < 55 °C) nach Gefahrstoffverordnung /GEF 13/. Die letztgenannte Kategorie fällt nicht mehr unter die Massen-Abstands-Beziehung nach BMI-Richtlinie (vgl. Abschnitt 2.2.2).

In Tab. 4-2 sind der Flammpunkt sowie die Explosionsgrenzen für verschiedene relevante Transportgüter dargestellt. Die geringste untere Explosionsgrenze weist Ottokraftstoff mit einem Wert von 0,6 Vol % auf. Im Gegensatz zu gasförmigen Stoffen wie Propan und Butan, die über eine UEG im Bereich weniger Prozent verfügen, erfolgt die Freisetzung von Ottokraftstoff allerdings deutlich langsamer. Detaillierte Szenarien zur Freisetzung nach Gefahrgutunfällen können im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

Tab. 4-2: Explosionsgrenzen von brennbaren Gasen und Flüssigkeiten in Luft
/BRA 88/, /BRA 03/

Brennbares Gas oder Dampf	FP [°C]	UEG [Vol-%]	OEG [Vol-%]
Aceton	< -20	2,5	14,3
Butadien	Gas	1,6	18,3
Propan	Gas	1,7	10,8
Butan	Gas	1,5	8,5
Ottokraftstoff	< -20	0,6	8,7
Cyclohexan	-18	1,0	9,3
Ethylen (Ethen)	Gas	2,4	32,6
Propylenoxid	< -20	1,9	24
Acetylen	Gas	2,4	100*
Ethylenoxid	57	2,6	100*
* selbstzerfallend bis 100 %			

Die Gaswarneinrichtung eines Kernkraftwerkes ist so auszulegen, dass eine herannahende Gaswolke rechtzeitig detektiert wird. Für den „Schutz von Kernkraftwerken ge-

gen das Eindringen und die Einwirkung explosionsfähiger und leicht entzündlicher Stoffe“ wurde in den 1980er Jahren ein eigenes Regelvorhaben zu einer geplanten kerntechnischen Regel KTA 2205 aufgelegt. Dieses Vorhaben ruhte ab Ende 1985, da weitere Erkenntnisse zum Ausbreitungsverhalten von Schwergaswolken gesammelt werden sollten. Auf der Sitzung des KTA im September 1988 wurde beschlossen, das Regelvorhaben KTA 2205 neben anderen Vorhaben zu streichen.

Die wesentlichsten Anforderungen an Gaswarnsysteme sind deshalb in der Regel KTA 2103 „Explosionsschutz in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren (allgemeine und fallbezogene Anforderungen) /KTA 00/ geregelt. In der KTA 2103, Fassung Juni 2000 /KTA 00/ wird gefordert, dass die Messköpfe der Gaswarneinrichtung so anzuordnen sind, dass eine rechtzeitige Alarmierung und Auslösung von Schaltmaßnahmen erfolgen kann. Dabei sind Messköpfe entweder unmittelbar vor der Einlassöffnung des Zuluftkanals oder in geeignetem Abstand bis hin zum Kraftwerkszaun anzuordnen. Ferner wird gefordert, dass die Alarmschwelle der Gaswarneinrichtung grundsätzlich auf Werte von 10 % bis 20 % der unteren Explosionsgrenze des zu erwartenden Gasgemisches eingestellt wird. Die Alarmverzögerungszeit t_A der Gaswarneinrichtung plus der Zeitspanne t_S vom Auslösen des Gasalarms bis zum geschlossenen Zustand der Belüftungsanlage muss kleiner sein, als die Zeitspanne t_G , die das Gas/Luft-Gemisch zur Zurücklegung des Gaswegs s_G benötigt.

$$t_A + t_S \leq t_G$$

Die Alarmverzögerungszeit t_A ist die Zeitspanne zwischen einer sprunghaften Konzentrationsänderung am Eingang der Gaswarneinrichtung und der Änderung des Messwertes auf den Anteil A (üblicherweise 20 %) der Gesamtänderung.

Die Schließzeit t_S schließt bei nicht automatischer Auslösung auch die Reaktionszeit des Wartepersonals ein.

Der Gasweg s_G wird in der aktuell gültigen KTA 2103 als Weg zwischen dem Ort des Messkopfes und dem Ort der ersten während des Normalbetriebes zu erwartenden Zündquelle im zu schützenden Gebäude definiert. In dem Regeländerungsentwurfsvorschlag 2013-03 zur KTA 2103 wurde s_G neu definiert als Strecke bis zur ersten wirksamen Verschlusseinrichtung der Lüftungsanlage in den zu schützenden Gebäuden.

Die an einer explosionsfähigen Stoffwolke beteiligten Gase bzw. Dämpfe und die Wanderungsgeschwindigkeit der Wolke zwischen Messköpfen und Einlassöffnungen werden standortspezifisch festgelegt. Für eine Referenzanlage wurde gezeigt, dass ein neuartiges Gaswarnsystem eine Alarmverzögerungszeit für Kohlenwasserstoffgemische von kleiner als 10 s aufweist. Für die Referenzanlage wird hierdurch ein automatisches Schließsignal ausgelöst, wobei eine Schließzeit von 1 s angenommen wird. Diese Betrachtung zeigt, dass die Verzögerungszeit bei Einleitung des Schließvorgangs als Handmaßnahme ein relevantes Zeitintervall darstellt. In der RSK-Sicherheitsüberprüfung /RSK 11/ wurde dargelegt, dass die meisten Anlagen über eine automatische Auslösung des Lüftungsabschlusses verfügen. In einigen Anlagen ist die Auslösung als Handmaßnahme realisiert. Aufgrund der verschiedenen standortspezifischen Einflussfaktoren kann hier keine eingehende Bewertung vorgenommen werden. Generell ist allerdings davon auszugehen, dass bei ansonsten gleicher Ausführung durch eine automatische Auslösung die Robustheit der Auslegung bzgl. Spätschließen erhöht wird.

Ein deutsches Kernkraftwerk verfügt neben der Möglichkeit der Absperrung der Lüftungsöffnungen des Notstandsgebäudes zusätzlich über Flammendurchschlagsicherungen an den Lufteinlässen. Bei Vorliegen explosionsfähiger Atmosphäre verhindern diese das Durchzünden einer Verbrennungsreaktion in das Gebäude. Das Prinzip einer Flammendurchschlagsicherung beruht auf dem Einbau von Körpern mit kleinen durchströmten Spalten und großen Oberflächen, die eine eintretende Flamme soweit kühlen, dass diese erlischt.

Falls eine explosionsfähige Gas/Luft-Atmosphäre bzw. Dampf/Luft-Atmosphäre im Bereich der Zuluftöffnungen sicherheitstechnisch wichtiger Lüftungssysteme auftritt und der Lüftungsabschluss nicht oder spät erfolgt, kommt es zum Eintritt über die Zuluftzentrale und zu einer Anreicherung der Atmosphäre in den Anlagenräumen. Über die Zündwirksamkeit von Komponenten im Zuluftstrom, wie dem Zuluftventilator oder eine ggfs. eingeschaltete Heizung, kann hier keine Aussagen getroffen werden. Grundsätzlich sind diese Komponenten als Zündquelle geeignet. Es ist allerdings aus der Literatur bekannt, dass die Mindestzündenergie für ein ruhendes Gemisch deutlich geringer ist als für ein strömendes Gemisch. Insofern ist es vorstellbar, dass eine Zündung erst eintritt, wenn die Strömungsgeschwindigkeit reduziert wird.

Für einen Anreicherungsprozess von explosionsfähiger Atmosphäre in den Anlagenräumen gelten wieder die in Abschnitt 4.2.1 gemachten Überlegungen. Entsprechend

Abb. 4-2 würde z. B. bei einer Außenluftkonzentration in der Höhe der zweifachen UEG bei einem Luftwechsel von 10 h^{-1} die UEG in den Anlagenräumen nach ca. 240 s (4 min) erreicht.

Wie umfassend in einem solchen Fall die Folgen einer anlageninternen Explosion wären, hängt insbesondere von der Gesamtmenge eingetragener explosionsfähiger Atmosphäre ab. Im Rahmen dieses Vorhabens können dazu keine Aussagen getroffen werden.

4.3 Robustheit der Auslegung der Notstrom- bzw. Notstandsdieselaggregate

Bezüglich der Auslegung der Notstrom- und Notstandsdieselaggregate gegen luftgetragene gefährliche Stoffe und Explosionsdruckwellen sind keine detaillierten Unterlagen und Konzepte verfügbar. Gezielte Fragen hierzu wurden auch im Rahmen der RSK-SÜ /RSK 11/ nicht gestellt.

Grundsätzlich ist die Auslegung der Notstromerzeugungsanlage gegen sehr seltene zivilisatorische Einwirkungen von außen nicht erforderlich. Zur Kombination des Ereignisses „Notstromfall“ mit dem unabhängigen Ereignis „Auftreten gefährlicher Gase“ sind keine Untersuchungen bekannt. Im Rahmen dieses Vorhabens konnte nicht ermittelt werden, welche atmosphärischen Bedingungen, insbesondere Mindestsauerstoffkonzentration, zum Starten und zum Betrieb der Dieselaggregate erforderlich sind. Bei dieser Ereigniskombination ist ebenfalls relevant, wie lange eine Gaswolke in gefährlicher Konzentration auftreten kann, wie viele Neustartversuche mit einem Dieselaggregat unter diesen Bedingungen möglich sind und wie das Spülen von belasteten Zuluftbereichen erfolgt. Bewertungen hierzu können erst erfolgen, wenn Freisetzungs- und Ausbreitungsszenarien mit in die Betrachtung einbezogen werden.

Beim Ereignis Explosionsdruckwelle wird davon ausgegangen, dass hierdurch der Notstromfall bzw. Notstandsfall hervorgerufen wird (vgl. auch Kap. 5.1). Tatsächlich hat es in der deutschen und internationalen Betriebserfahrung bereits Ereignisse gegeben, bei denen durch Verbrennungsgase bzw. Partikel im Bereich spannungsführender Teile Kurz- bzw. Erdschlüsse an den Netzanschlüssen hervorgerufen wurden. So hat ein explosionsartiges Versagen eines Strom-Spannungs-Wandlers an einem deutschen Kernkraftwerk zum Notstromfall durch Ausfall der Haupt- und Fremdnetzanbindung

geführt. Ebenfalls lösten Brandgase im Bereich der Freileitung eines amerikanischen Kernkraftwerks einen Kurzschluss aus /ROE 11/, /NEA 13/.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Notstromerzeugergebäude von deutschen Kernkraftwerken über keine explizite Auslegung gegen Explosionsdruckwellen verfügen. Bei Ausfall der Notstromerzeugung tritt der Notstandsfall ein und die Notstandsdieselmotoren werden benötigt.

Das Notstandsgebäude ist deshalb bzgl. der mechanischen Lasten entsprechend der Druckwellenrichtlinie des BMI /BMI 76/ ausgelegt. Die Zuluftversorgung der Notstandsdieselmotoren erfolgt über eigene Lüftungskanäle, die zu zwei Gebäudeseiten hin geöffnet sind. In diesen Lüftungskanälen sind Brandschutzklappen angeordnet, die im Falle z. B. eines Kerosinbrands auf einer Gebäudeseite selbsttätig durch die Auslösung eines Schmelzlots schließen. Die Zuluftversorgung der Notstandsdieselmotoren erfolgt dann über die andere Gebäudeseite. Es wird dabei davon ausgegangen, dass der Brand nur auf einer Seite zu einer Beeinträchtigung der Zuluftqualität führt und dass diese Beeinträchtigung über die thermischen Auswirkungen automatisch zur Auslösung der Brandschutzklappen führt. Es kann im Rahmen dieses Vorhabens nicht ausgeschlossen werden, dass eine Gasexplosion zur Auslösung der Brandschutzklappen auf beiden Seiten des Notstandsgebäudes führt und somit die Zuluft für die Notstandsdieselaggregate nicht mehr zur Verfügung steht. Ferner ist es vorstellbar, dass eine Explosion innerhalb der beidseitig offenen Zuluftkanäle des Notstandsgebäudes stattfindet und Zerstörungen der Kanäle hervorruft.

5 Berücksichtigung von Einwirkungen durch Eindringen gefährlicher Stoffe und chemische Explosionen in der PSA für Kernkraftwerke in Deutschland

5.1 Methodisches Vorgehen nach PSA-Methodenband

Entsprechend dem „Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse“ /BMU 05/ und seines Fachbands zu PSA-Methoden /FAK 05/ ist im Rahmen einer PSA der Stufe 1 im Leistungsbetrieb die Betrachtung der übergreifenden Einwirkungen von außen „Flugzeugabsturz“, „Explosionsdruckwelle“, „Hochwasser“ und „Erdbeben“ gefordert. Andere Einwirkungen von außen sind zwar grundsätzlich in der PSA zu berücksichtigen (z. B. wetter- und witterungsbedingte Einwirkungen), die Behandlung von Einwirkungen luftgetragener gefährlicher Stoffe in der PSA wird aber nicht explizit gefordert.

Dementsprechend wird im PSA-Methodenband /FAK 05/ eine Methodik zur probabilistischen Bewertung von Ereignissen aufgrund der übergreifenden Einwirkung „Explosionsdruckwelle“ vorgestellt, die im Wesentlichen auf /HOF 96/ zurückgeht.

Ausgangspunkt dieser methodischen Vorgehensweise in /FAK 05/ ist eine Kategorisierung der Gebäude und Anlagenbereiche in die nachfolgend aufgeführten drei Gebäudeklassen („Bereiche“) A bis C entsprechend den unterschiedlichen Schadensauswirkungen bei einer anlagenspezifisch zu unterstellenden Explosionsdruckwelle:

- *„Bereich A: Enthält Systeme, bei deren Schädigung unmittelbar der Gefährdungszustand eintreten kann oder bei deren Schädigung ein auslösendes Ereignis eintreten kann, das durch das Notstandskühlsystem auslegungsgemäß nicht beherrscht wird.*
- *Bereich B: Enthält Systeme, bei deren Schädigung nicht unmittelbar der Gefährdungszustand eintreten kann, bei deren Schädigung aber ein auslösendes Ereignis eintreten kann, das durch das Notstandskühlsystem auslegungsgemäß beherrscht wird.*
- *Bereich C: Enthält das Notstandskühlsystem*

Zum Bereich A gehören z. B. der Primärkühlmittelkreislauf und die Frischdampfsicherheits- und Absperrarmaturenstation (DWR) bzw. Frischdampfiso- und Druckentlastungsarmaturen (SWR).

Zum Bereich B gehören z. B. der Netzanschluss mit den Maschinentransformatoren und die Eigenbedarfsanlagen (Notstromfall), das Maschinenhaus (Frischdampfleitungsbruch, Ausfall HWS, Ausfall HSpW) und das Schaltanlagegebäude (Ausfall HWS, Ausfall HSpW). (...)

Der Bereich C (Notstandskühlsystem) besteht aus Gebäuden, die baulich gegen Einwirkungen von außen, also auch gegen EDW, ausgelegt sind.“

Die Methodik sieht ferner ein gestaffeltes Vorgehen in Abhängigkeit der beiden Kriterien

(1) Eintrittshäufigkeit einer Explosion $< 10^{-5}/a$ und

(2) Auslegung der Bereiche A und C gemäß Druckwellenrichtlinie des BMI /BMI 76/ bzgl. des angenommenen Druck-Zeit-Verlaufs einer Explosion und der einzuhaltenden Sicherheitsabstände entsprechend der Massen-Abstands-Beziehung

vor. Diese Staffelung ist in Tab. 5-1 dargestellt; wobei für alle derzeit noch im kommerziellen Betrieb befindlichen deutschen Kernkraftwerke das Kriterium (2) erfüllt ist /RSK 11/, die „detaillierte Analyse“ nach /FAK 05/ also nicht erforderlich wird.

Die Eintrittshäufigkeit einer Explosion besteht nach /FAK 05/ aus den Beiträgen „Detonationen“ (Sprengstoffexplosionen bzw. exotherm zerfallende Gase) und „Deflagrationen“ (Gaswolkenexplosionen). Falls die Eintrittshäufigkeit einer Explosion den Referenzwert von $10^{-5}/a$ unterschreitet und – wie bei den noch im kommerziellen Betrieb befindlichen deutschen Kernkraftwerken gegeben – die Anforderungen der Druckwellenrichtlinie /BMI 76/ eingehalten werden, wird nach /FAK 05/ davon ausgegangen, dass die Häufigkeit von Kernschadenzuständen infolge einer Explosionsdruckwelle unterhalb von $10^{-7}/a$ liegt und damit keine vertieften probabilistischen Analysen erforderlich sind.

Tab. 5-1: Gestaffeltes Nachweisverfahren zur Explosionsdruckwelle (aus /FAK 05/)

Kriterium	Analyseumfang
(1) Eintrittshäufigkeit $< 10^{-5}/a$ (2) Auslegung der Bereiche A und C gemäß /BMI 76/: Lastannahmen und Sicherheitsabstände	Verifikation anhand des Überprüfungsansatzes
(1) nicht erfüllt (2) erfüllt	Konservative Abschätzung der Eintrittshäufigkeit
(1) nicht erfüllt (2) nicht erfüllt	Detaillierte Analyse (mögliche Methodik in /HOF 96/)

Falls die Eintrittshäufigkeit einer Explosion den Schwellenwert von $10^{-5}/a$ überschreitet und die Anforderungen der Druckwellenrichtlinie /BMI 76/ eingehalten sind, wird nach /FAK 05/ davon ausgegangen, dass im ungünstigsten Fall durch das Ereignis Explosionsdruckwelle

- kein Ereignis ausgelöst wird, das unmittelbar zu einem Gefährdungszustand führt,
- ein Systemversagen im Bereich B auftritt und ein auslösendes Ereignis ausgelöst wird, welches auslegungsgemäß durch das Notstandkühlsystem beherrscht werden kann und
- das Notstandkühlsystem vor den Einwirkungen aus einer Explosionsdruckwelle geschützt ist.

Als ungünstigster Fall wird als auslösendes Ereignis ein Notstromfall mit Zerstörung der Sekundäranlagen (Hauptwärmesenke, Speisewasserversorgung) unterstellt, der mit der anzusetzenden Gesamteintrittshäufigkeit für die Einwirkung EDW eintritt. Es wird im Sinne einer Analysenvereinfachung in /FAK 05/ angenommen, dass zusammen mit dem Eintreten dieses Ereignisses alle außerhalb der Bereiche A und C angeordneten Systeme ausfallen.

Entsprechend dieser Vorgehensweise wird das Ereignis EDW in /HOF 96/ auf die Ereignisbäume für „Notstromfall“ bzw. „Notstandsfall“ zurückgeführt.

5.2 Anmerkungen zum Vorgehen nach PSA-Methodenband

Das methodische Vorgehen zur Berücksichtigung von Explosionsdruckwellen aus chemischen Explosionen im Fachband des PSA-Leitfadens zu PSA-Methoden /FAK 05/ berücksichtigt nicht die Möglichkeit des Auftretens von Explosionsereignissen oberhalb der Auslegung nach Druckwellenrichtlinie des BMI /BMI 76/. Die überschlägigen Abschätzungen in Abschnitt 4.1 haben aber gezeigt, dass die mechanische Auslegung gegen typische Explosionsphänomene für die noch im kommerziellen Betrieb befindlichen deutschen Kernkraftwerke sehr robust ist. Zur Möglichkeit der Beeinträchtigung der Zuluftversorgung der Notstandsdieselaggregate durch Gaswolkenexplosionen (vgl. Abschnitt 4.3) werden im Fachband /FAK 05/ ebenfalls keine Aussagen getroffen. Hierzu ist allerdings anzumerken, dass zur Beurteilung dieser Fragestellung bisher keine deterministischen Untersuchungen vorliegen und deshalb eine probabilistische Bewertung verfrüht erscheint.

Da das Ereignis Explosionsdruckwelle insgesamt schon ein „seltenes Ereignis“ ist, wird die Wahrscheinlichkeit, dass solche Ereignisse auf Grund ihrer spezifischen Randbedingungen zu auslegungsüberschreitenden Ereignisabläufen führen können, als sehr gering eingeschätzt. Grundsätzlich ist standortspezifisch eine (probabilistische) Gefährdungsanalyse in Bezug auf die übergreifende Einwirkung „Explosionsdruckwelle“ durchzuführen, auf deren Basis sich die Eintrittshäufigkeit des einleitenden Ereignisses abschätzen lässt. Dieses Vorgehen ist methodisch für alle Einwirkungen von außen vergleichbar. Änderungen bzw. neue Methoden dazu werden nicht für erforderlich erachtet.

Falls die standortspezifische Eintrittshäufigkeit der Einwirkung nicht dem Restrisiko zuzuordnen ist, ist zumindest eine grobe Abschätzung der Häufigkeit von Brennstabschäden über einwirkungsspezifische Ereignisablaufdiagramme und die zugehörigen Fehlerbäume vorzunehmen. Dafür stehen grundsätzlich Methoden in /FAK 05/ zur Verfügung.

Die im PSA-Methodenband /FAK 05/ vorgeschlagene Vorgehensweise zur Behandlung von Explosionsdruckwellen in der PSA der Stufe 1 berücksichtigt nur die Einwirkungen von Druckwellen, nicht aber die Einwirkungen einer gefährlichen explosionsfähigen Atmosphäre auf die zu schützenden Gebäude. Die Möglichkeit des Nichtschließens (oder Spätschließens) der Lüftungssysteme von Gebäuden der Bereiche A und C wird nicht diskutiert.

Das Nicht- bzw. Spätschließen von Zuluftöffnungen von zu schützenden Gebäuden in Verbindung mit anstehenden gefährlichen Gaswolken ist sicherlich ein sehr seltenes, ggf. aber sehr schwerwiegendes Ereignis. Das Schließen von Absperrklappen erfordert als erstes die Detektion von explosionsfähigen Gaswolken, z. B. durch das Gaswarnsystem oder durch externe Informationen nach unfallbedingten Freisetzung. Danach muss ein Signal zum Schließen erfolgen, welches entweder automatisch durch das Gaswarnsystem oder manuell von der Warte erfolgt. Der Schließvorgang erfordert die Signalweiterleitung und die Funktionsfähigkeit der elektromechanischen Komponenten.

Unterstellt man eine nicht zu vernachlässigende Eintrittshäufigkeit für die Entstehung explosionsfähiger Gasgemische, ist der Ereignisablauf probabilistisch zu untersuchen. Es sind Zuverlässigkeitsanalysen sowohl in Bezug auf die technische Zuverlässigkeit der Gasdetektionseinrichtungen wie auch der zu schließenden Armaturen zur Absperrung der Lüftung ebenso wie Untersuchungen zur Zuverlässigkeit der erforderlichen menschlichen Handlungsabläufe durchzuführen. Danach sind die für diese Einwirkung spezifischen Ergebnisse in die PSA der Stufe 1 zu integrieren.

Entsprechend aktuellen internationalen Anforderungen der IAEA an eine PSA der Stufe 1 /IAE 10/ und Empfehlungen seitens der WENRA Reactor Harmonization Working Group (RHWG) /WEN 13/ sollten grundsätzlich alle übergreifenden Einwirkungen von innen und außen systematisch mittels eines gestaffelten Vorgehens in der PSA berücksichtigt werden. Dazu ist zunächst eine standortspezifische Gefährdungsanalyse erforderlich. Sofern diese eine zu vernachlässigende Eintrittshäufigkeit für eine bestimmte Einwirkung am jeweiligen Anlagenstandort unter den jeweiligen Randbedingungen des Leistungs- oder Nichtleistungsbetriebs ergibt, kann dies dann mittels einer groben probabilistischen Abschätzung erfolgen. Anderenfalls sind vertiefte probabilistische Untersuchungen erforderlich. Diese Vorgehensweise wird auch in den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 12/ gefordert.

Eine entsprechende Ergänzung zum generellen Vorgehen im Fachband des PSA-Leitfadens zu PSA-Methoden wird daher in Konsistenz mit den aktuellen Anforderungen zur Nachweisführung im untergeordneten kerntechnischen Regelwerk /BMU 12/ als zielführend erachtet. Dies gilt konform mit internationalen Anforderungen (vgl. /IAE 10/ und /WEN 13/) auch vor dem Hintergrund der lang andauernden Anlagenstillstände und den sich dabei ggf. deutlich verändernden Randbedingungen.

5.3 Notwendigkeit zur Berücksichtigung der besonderen Umstände und Randbedingungen des Nichtleistungsbetriebs in der PSA

Nach heutigem Stand sehen der „Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse“ /BMU 05/ und der zugehörige Fachband zu PSA-Methoden /FAK 05/ die probabilistische Bewertung übergreifender Einwirkungen von außen explizit nur für den Leistungsbetrieb vor. Dies schließt auch die Betrachtung von Einwirkungen aus Explosionsdruckwellen für den Leistungsbetrieb ein. Eine probabilistische Bewertung von Einwirkungen von außen unter den besonderen Umständen und Randbedingungen bei Anlagenbetriebszuständen des geplanten wie ungeplanten Nichtleistungsbetriebs einschließlich der lang andauernden Nachbetriebsphase ist bisher nicht erforderlich.

In Bezug auf die in diesem Vorhaben zu betrachtende übergreifende Einwirkung „Explosionsdruckwelle“ sind als spezielle Randbedingungen bei Nichtleistungsbetrieb neben der durch revisionsbedingte Freischaltungen reduzierten Anzahl von Redundanzen, die sich in den Ereignis- und Fehlerbäumen berücksichtigen lassen, insbesondere zusätzliche Gebäudeöffnungen bzw. eine erhöhte Zahl von Öffnungs- und Schleusungsvorgängen und eine erhöhte Menge an Gefahrstoffen und ein häufigerer Umgang damit auf dem Anlagengelände zu nennen.

Der methodische Ansatz zur Behandlung von Einwirkungen von außen in einer PSA ist für Anlagenbetriebszustände des Nichtleistungsbetriebs zunächst grundsätzlich denen des Leistungsbetriebs vergleichbar. Dabei ist in den Ereignis- und Fehlerbäumen zu berücksichtigen, dass aufgrund der abgeschalteten Anlage verschiedene Einrichtungen und Systeme, die bei Leistungsbetrieb zur Gewährleistung des sicheren Betriebs benötigt werden, in diesen Betriebsphasen nicht erforderlich sind. Andererseits muss aber auch berücksichtigt werden, dass in diesen Betriebsphasen bestimmte, redundant vorhandene Einrichtungen des Sicherheitssystems aufgrund von Inspektions- und Wartungsarbeiten ggf. nicht zur Verfügung stehen. Diesen beiden gegenläufigen Aspekten muss die PSA Rechnung tragen, ein grundsätzlicher methodischer Unterschied besteht aber nicht.

Während Anlagenstillstandsphasen können aber auch Barrieren reduziert sein. Beispielsweise können zusätzliche relevante Gebäudeöffnungen vorhanden sein, wenn an sicherheitstechnisch wichtigen baulichen Anlagenteilen, z. B. Kanalbauwerken, Revisionsarbeiten stattfinden und temporäre Einstiege geschaffen werden. Da solche Einstiege in der Regel aber auch Grenzen des inneren Sicherungsbereichs darstellen,

gelten einschlägige Objektschutzanforderungen, die z. B. zu einer ständigen Überwachung eines Einstiegs bzw. zum schnellen Wiederverschließen führen. Ferner ist davon auszugehen, dass die Redundanzen, an denen temporäre Öffnungen vorhanden sind, in diesem Zeitraum freigeschaltet sind.

Neben den Objektschutzanforderungen ergeben sich Anforderungen aus dem Brandschutz und der Unterdruckhaltung des Kontrollbereichs (Kontrollbereichsabschluss). Temporäre Öffnungen, z. B. von Kabel- oder Rohrabschottungen, werden aus Brandschutzgründen provisorisch mit so genannten „Brandschutzkissen“ verschlossen. Solche Öffnungen befinden sich typischerweise innerhalb der Gebäude. Durchführungen zum Kontrollbereich erfüllen erhöhte Anforderungen an die Gasdichtigkeit, die auch für temporäre Öffnungen sicherzustellen ist. Außerhalb des Kontrollbereichs besteht keine Anforderung, temporäre Öffnungen gasdicht zu verschließen.

Da nur geringe Druckunterschiede zwischen dem Gebäudeteil des Nichtkontrollbereichs und der Außenatmosphäre zu erwarten sind, sind auch nur geringe Austauschströmungen anzunehmen. Ein relativ großer Eintrag von gefährlichen Stoffen in ein Bauwerk kann auftreten, falls Schwergase in Öffnungen von unterirdischen Kanalbauwerken hineinströmen.

Zum Kontrollbereich herrschen entsprechend der vorgegebenen Druckstaffelung (vgl. KTA 3601 „Lüftungstechnische Anlagen in Kernkraftwerken“, Fassung 11/05 /KTA 05/) Druckunterschiede von ca. 2,5 mbar zu den großen Anlagenräumen im Sicherheitsbehälter und bis zu 0,5 mbar zum Hilfsanlagegebäude. Unter der Voraussetzung, dass die Druckdifferenz nicht zusammenbricht, werden bei 0,5 mbar Differenz z. B. Gaseintrittsgeschwindigkeiten im Bereich von 6 m/s erreicht.

An der Materialschleuse zum Sicherheitsbehälter sind auch im Nichtleistungsbetrieb die beiden Schleusentüren gegeneinander verriegelt, so dass die Druckdifferenz nicht zu Einträgen von externer Atmosphäre führt. Eine Überbrückung der Verriegelung wird nur in sehr seltenen Fällen notwendig. Ähnliches gilt für die Materialschleuse des Hilfsanlagegebäudes. Das Hilfsanlagegebäude benötigt wegen der enthaltenen Systemfunktionen zudem keine Auslegung gegen Explosionsdruckwelle.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass temporäre Öffnungen nur zu geringen Massenströmen gefährlicher Stoffe in sicherheitstechnisch wichtige Gebäude führen können. Zusätzlich sind im direkten Bereich der Öffnungen tendenziell keine sicherheitstech-

nisch wichtigen Komponenten installiert bzw. die betreffende Redundanz ist auf Grund der revisionsbedingten Arbeiten freigeschaltet.

Deshalb wird davon ausgegangen, dass der Beitrag von Gefährdungszuständen durch temporäre Öffnungen bei Nichtleistungsbetrieb deutlich geringer ist als der Beitrag durch das Nichtschließen von Öffnungen im Bereich der Zuluftanlage. Dies muss in der PSA für übergreifende Einwirkungen von außen Berücksichtigung finden, erfordert aber keine grundsätzliche Änderung in der methodischen Behandlung.

Die Menge an und der Umgang mit gefährlichen Stoffen, z. B. dem Schweißgas Acetylen, sind auf dem Anlagengelände während der Anlagerevision erhöht. Mögliche Explosionsereignisse würden aber mit großer Wahrscheinlichkeit keinen Beitrag zur Gefährdungshäufigkeit liefern, da die Heftigkeit einer Explosion unterhalb der Auslegung nach Druckwellenrichtlinie /BMI 76/ bleiben würde. Gasfreisetzungen aus Einzelgebäude führen zu eher geringen Freisetzungsmengen bzw. Massenströmen. Es wird deshalb und aufgrund der Anforderungen der KTA 2103 zum Explosionsschutz in Kernkraftwerken /KTA 00/ davon ausgegangen, dass es aufgrund der Entfernung zwischen Freisetzungsort (z. B. Gaslager) und Zuluftöffnungen der sicherheitstechnisch wichtigen Gebäude zu keinen relevanten Gefahrstoffkonzentrationen innerhalb der Gebäude kommt. Eine ingenieurtechnische Freisetzungs- und Ausbreitungsrechnung zu dieser Fragestellung wurde bisher nicht durchgeführt.

Insgesamt ist mit der erhöhten Menge an Gefahrstoffen und dem verstärkten Umgang mit diesen während Anlagenbetriebszuständen des Nichtleistungsbetriebs nur ein sehr geringer Anstieg des Risikos für eine Gefährdung der Sicherheit der Anlage verbunden, so dass eine detaillierte probabilistische Analyse für den Nichtleistungsbetrieb im Allgemeinen für nicht erforderlich erachtet wird. Die veränderten Randbedingungen und Daten müssen aber in der Bewertung Berücksichtigung finden.

Gemäß aktuellen internationalen Anforderungen der IAEA an eine PSA der Stufe 1 /IAE 10/ und Empfehlungen seitens der WENRA Reactor Harmonization Working Group (RHWG) /WEN 13/ sind alle übergreifenden Einwirkungen von innen und außen systematisch mittels eines gestaffelten Vorgehens in der PSA, auch bei Nichtleistungsbetrieb zu berücksichtigen. Sofern die zunächst standortspezifisch durchzuführende Gefährdungsanalyse eine zu vernachlässigende Eintrittshäufigkeit für eine bestimmte Einwirkung am zu untersuchenden Anlagenstandort unter den jeweiligen Randbedingungen des Leistungs- oder Nichtleistungsbetriebs ergibt, kann die Bewertung – unter

Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen während Betriebsphasen des Nichtleistungsbetriebs - dann mittels einer groben probabilistischen Abschätzung erfolgen. Anderenfalls sind, wie auch in den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 12/ gefordert, vertiefte probabilistische Untersuchungen erforderlich.

Eine entsprechende grundsätzliche Ergänzung zur systematischen Berücksichtigung übergreifender Einwirkungen von innen wie außen in der PSA im PSA- Methodenband wird daher - auch vor dem Hintergrund der zukünftigen, lang andauernden Anlagenstillstände während der Nachbetriebsphase der nicht mehr kommerziell betriebenen Kernkraftwerke in Deutschland und den sich dabei ggf. deutlich verändernden Randbedingungen - in Konsistenz zu den Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke /BMU 12/ und konform zu internationalen Anforderungen/IAE 10/ für zielführend erachtet.

6 Schlussfolgerungen und weiterer Untersuchungsbedarf

Im vorliegenden Bericht wurden die Auslegung und die Robustheit bezüglich der Einwirkung chemischer Explosionen und von gefährlichen luftgetragenen Stoffen betrachtet.

Im Rahmen des möglichen Überprüfungsumfangs wurde festgestellt, dass die Auslegung der Kernkraftwerke in Deutschland gegen chemische Explosionen bezüglich des angenommenen Überdruck-Zeit-Verlaufs und der Massen-Abstands-Beziehung sehr robust ist. Ein Sonderfall dabei ist der sogenannte BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion), also eine Explosion einer expandierenden siedenden Flüssigkeit, welche u. a. bei geschlossenen Tankbehältern entstehen können, die brennbare flüssige bzw. verflüssigte Substanzen oder Substanzgemische enthalten. Auf solche BLEVE ist die Vorgehensweise zur Festlegung der zu Grunde zu legenden Masse L nicht anwendbar. Eventuelle Auswirkungen einer möglichen Wasserstofftransportwirtschaft in der Nähe von Kraftwerksstandorten wurden ebenfalls nicht überprüft.

Beim Eindringen gefährlicher luftgetragener Stoffe in die Anlage wurde zwischen

- Gefahrstoffen, die die Handlungsfähigkeit des Personals herabsetzen können,
- korrosiven Gefahrstoffen und
- explosionsfähiger Atmosphäre

unterschieden. Automatische Vorkehrungen zur Erkennung von Gefahrstoffen der ersten zwei Kategorien sind in der Regel nicht vorhanden. Die konkrete Gefährdung der kerntechnischen Schutzziele muss allerdings bei Eindringen von Stoffen dieser Kategorien nicht befürchtet werden. Obwohl eine explosionsfähige Atmosphäre prinzipiell an allen deutschen Kernkraftwerksstandorten automatisch detektiert werden kann, geht von dieser Kategorie ein besonderes Risiko bezüglich der Schadfolgen aus.

Die Sicherheit der elektrischen Energieversorgung eines Kernkraftwerks in Bezug auf nicht-mechanische Auswirkungen von Gaswolkenexplosionen verdient besondere Beachtung. In der deutschen und internationalen Betriebserfahrung hat es bereits Ereignisse gegeben, bei denen durch Verbrennungsgase bzw. Partikel im Bereich spannungsführender Teile Kurz- bzw. Erdschlüsse an den Netzanschlüssen hervorgerufen wurden. So hat ein explosionsartiges Versagen eines Strom-Spannungs-Wandlers an

einem deutschen Kernkraftwerk zum Notstromfall durch Ausfall der Haupt- und Fremdnetzanbindung geführt. Ebenfalls lösten Brandgase im Bereich der Freileitung eines amerikanischen Kernkraftwerks einen Kurzschluss aus. Bezüglich der Auslegung der Notstrom- und Notstandsdieselaggregate gegen luftgetragene gefährliche Stoffe und Explosionsdruckwellen sind keine detaillierten Unterlagen und Konzepte verfügbar. Insofern konnte im Rahmen dieses Vorhabens nicht ausgeschlossen werden, dass Gasexplosionen im Bereich der Zuluftversorgung der Notstandsdieselmotoren zu einem Schließen der Brandschutzklappen oder zu einer Zerstörung der Zuluftkanäle führen können.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden keine konkreten Freisetzungs- und Ausbreitungsszenarien betrachtet, so dass Konzentrationen am Einlass von Lüftungsöffnungen nur grob abgeschätzt wurden. Mit Ausbreitungsbetrachtungen lässt sich ebenfalls abschätzen, ob von der räumlichen Entfernung von Notstromerzeugergebäude und Notstandsgebäude bzw. der Funktionsfähigkeit der Dieselaggregate Kredit genommen werden kann.

Für die Behandlung der Einwirkungen aus chemischen Explosionen innerhalb der PSA konnte kein konkreter Erweiterungsbedarf gefunden werden, was bezüglich der mechanischen Explosionsauswirkungen auch auf die robuste Auslegung zurückzuführen ist. Die Berücksichtigung der Zuverlässigkeit des Gaswarnsystems einschließlich der automatischen oder manuellen Schalthandlungen bis zum Schließen der Gebäudezuluft erscheint aber wegen der großen möglichen Schadfolgen sinnvoll. Für die in diesem Bericht angesprochenen möglichen Schadwirkungen wie Kurzschlüsse oder Unverfügbarkeit der Notstrom- und Notstandsstromversorgung liegen bisher keine deterministischen Bewertungsmethoden vor, so dass probabilistische Methoden außer Reichweite sind.

Für Anlagenbetriebszustände des Nichtleistungsbetriebs ergeben sich aus Sicht der Autoren keine spezifischen, innerhalb einer eigenen Methode zu berücksichtigenden Risiken. Der methodische Ansatz zur Behandlung von Einwirkungen von außen in einer PSA ist für Anlagenbetriebszustände des Nichtleistungsbetriebs grundsätzlich denen des Leistungsbetriebs vergleichbar. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass sich die Randbedingungen für die Analysen für den Nichtleistungsbetrieb von denen des Leistungsbetriebs dahingehend unterscheiden, dass bei Nichtleistungsbetrieb einerseits bestimmte Einrichtungen und Systeme zur Gewährleistung der Sicherheit nicht erforderlich sind, dass andererseits aber bestimmte Komponenten und Systeme nicht ver-

füßbar sind und auch Barrieren nicht oder nicht vollständig vorhanden sein können. Methodisch macht dies keinen wesentlichen Unterschied, die Analyseergebnisse können sich aber durchaus unterscheiden.

Entsprechend nationalen wie internationalen Anforderungen an eine PSA der Stufe 1 sind alle Einwirkungen von außen systematisch mittels eines gestaffelten Vorgehens in der PSA, auch bei Nichtleistungsbetrieb, zu berücksichtigen. Sofern die standortspezifisch durchzuführende Gefährdungsanalyse in Bezug auf eine solche Einwirkung eine nicht zu vernachlässigende Eintrittshäufigkeit für eine bestimmte Einwirkung am zu untersuchenden Anlagenstandort ergibt, muss eine Bewertung der Häufigkeit von Brennstabschäden unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen bei Leistungs- bzw. Nichtleistungsbetriebs, ggf. auch nur mittels einer groben probabilistischen Abschätzung, erfolgen.

Innerhalb eines Nachfolgevorhabens sollten die bislang nicht vertieft betrachteten Fragestellungen untersucht werden. Bzgl. der Einwirkungen aus chemischen Explosionen sind dieses die möglichen Einwirkungen aus BLEVE Ereignissen sowie die Beurteilung der Risiken durch Wasserstofffreisetzungen. Ferner soll die Möglichkeit der Fehlauflösung der Brandschutzklappen der Zuluftversorgung der Notstandsdiesellaggregate durch Gaswolkenexplosionen untersucht werden.

Bzgl. der Gefährdung durch luftgetragene Stoffe sollen exemplarische Freisetzung- und Ausbreitungsszenarien betrachtet werden. Dabei sollen insbesondere entzündliche, aber auch toxische Stoffe betrachtet werden. Die Szenarien sollen realitätsnah unter Berücksichtigung der heute üblichen Transportmengen und Gebindegrößen festgelegt werden. Zur Bestimmung der Quellterme sind die physikalischen Parameter des Transportguts sowie durch Havarien hervorgerufene Leckgrößen etc. zu berücksichtigen. Die Ausbreitungsvorgänge bis zu den Zulufteinlässen der sicherheitstechnisch wichtigen Gebäude sollen mit Modellen nach dem heutigen Stand der Technik simuliert werden. Mit den sich ergebenden Konzentrations-Zeit-Verläufen soll beantwortet werden, unter welchen Bedingungen es ohne Berücksichtigung des Lüftungsabschlusses zu einer Anreicherung von gefährlichen luftgetragenen Stoffen in den Anlagenräumen kommen kann. Danach soll die Verfügbarkeit eines (automatischen) Lüftungsabschlusses auch unter Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe miteinbezogen werden. Ferner soll untersucht werden, ob vom Abstand zwischen Notstromerzeugergebäude und Notstandsgebäude im Falle von Notstromfällen in Kombination mit Stofffreisetzungen Kredit genommen werden kann.

7 Literatur

- /ACI 00/ Acikalin, A., M. Albrecht, M. Lambert, J. Steinbach
Ermittlung und Berechnung von Störfallablaufszenarien nach Maßgabe der
3. Störfallverwaltungsvorschrift, Band II: Berechnungsmethoden, aktuelle
Modelle und Modellgleichungen, TU Berlin, Institut für Prozeß- und Anla-
gentechnik, Berlin, 2000
- /BER 01/ Berg, H.-P., T. Schaefer, E. Schimetschka
Auslegung von Kernkraftwerken gegen „Einwirkungen von außen“ - Status-
bericht 2001, unveröffentlichter Bericht, KT-IB-15-REV-2, Bundesamt für
Strahlenschutz, Salzgitter, März 2001
- /BMI 76/ Bundesministerium des Inneren(BMI)
Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen durch
chemische Reaktionen durch Auslegung der Kernkraftwerke hinsichtlich ih-
rer Festigkeit und induzierter Schwingungen sowie durch Sicherheitsab-
stände, Stand: August 1976, Bekanntmachung 13. September 1976 (BAnz.
1976, Nr. 179), 3-6, RS-Handbuch, Stand 12/01
www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/volltext/3_BMU/3_6.pdf
- /BMI 79/ Bundesministerium des Inneren (BMI)
Interpretationen zu den Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke, Interpretati-
on zu dem Sicherheitskriterium 2.6 „Einwirkungen von außen“, Bekanntma-
chung vom 17.05.1979, 3-50, RS-Handbuch, Stand 12/01
www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/volltext/3_BMU/3_50.pdf
- /BMU 05/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Sicherheitsüberprüfung für Kernkraftwerke gemäß §19a des Atomgesetzes
- Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse, 31. Januar 2005, Be-
kanntmachung vom 30. August 2005, Bundesanzeiger, Jahrgang 57,
Nummer 207a, ISSN 0720-6100, 3. November 2005

- /BMU 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Bekanntmachung der „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke“
vom 22. November 2012, BAnz AT 24.01.2013 B3, Veröffentlicht am Donnerstag, 24. Januar 2013,
http://regelwerk.grs.de/downloads/banz_sianf.pdf,
http://www.bmu.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/bekanntmachung-der-sicherheitsanforderungen-an-kernkraftwerke-vom-22-november-2012/?tx_ttnews%5BbackPid%5D=266
- /BOH 86/ Bohn, T. (Hrsg.), Autorengemeinschaft
Kernkraftwerke, Technischer Verlag Resch, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1986
- /BOS 05/ van den Bosch, C. J. H., R.A.P.M. Weterings (Hrsg.)
Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials and gases – Yellow Book. TNO, Committee for the Prevention of Disasters, 3. Auflage, The Netherlands, 2005
- /BRA 88/ Brauer, L.
AUER Technikum, Ausgabe 12, Auergesellschaft GmbH, Berlin, 1988
- /BRA 03/ Brandes, E.; Möller, W.
Sicherheitstechnische Kenngrößen, Band 1: Brennbare Flüssigkeiten und Gase, PTB Braunschweig, Wirtschaftsverlag, Bremerhaven, 2003
- /BRA 09/ Brandes, E., O. Klais, N. Pfeil, T. Schendler, P. Schulte
„Explosionsfähig“ — Eigenschaften und Regelungen, Technische Überwachung, Bd. 50, Nr. 1 / 2, Düsseldorf, 2009, S. 38 - 46
- /FAK 05/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke
Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke,
Stand: August 2005, BfS-SCHR-37/05, Salzgitter, Oktober 2005
- /FOR 10/ Forell, B.
Bewertung der akuten Toxizität von Brandrauch, Technische Überwachung
Bd. 51, Nr. 3, Düsseldorf, 2010, S. 20 - 29

- /GEF 13/ Gefahrstoffverordnung
Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – Gef-StoffV) Vom 26. November 2010 (BGBl. I S 1643) geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 28. Juli 2011 (BGBl. I S 1622) durch Artikel 2 der Verordnung vom 24. April 2013 (BGBl. I S 944) und Artikel 2 der Verordnung vom 15. Juli 2013 (BGBl. I S 2514)
- /HOF 96/ Hoffmann, H. H.
Vorgehensvorschlag zur Durchführung einer probabilistischen Sicherheitsanalyse für das externe Ereignis „Explosionsdruckwelle“, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1997-476, Bonn, August 1996
- /HOS 96/ Hosser, D., G. Blume, W. Siegfried, J. Will
Untersuchungen zur Regelfähigkeit von brandschutztechnischen Nachweisen im Rahmen von KTA 2101.2. Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1996-467, Bonn, 1996
- /IAE 10/ International Atomic Energy Agency (IAEA):
Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-3, STI/PUB/1430, ISBN 978-92-0-114509-3, Vienna, Austria, April 2010
- /KIR 10/ Kirchner, S.
Schutz von Kernkraftwerken gegen zivilisatorische Einwirkungen. Foliensatz zum GRS-Behördenseminar „Übergreifende Einwirkungen von außen“, 28. September 2010
- /KTA 00/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA)
Sicherheitstechnische Regel des KTA: KTA 2103 Explosionsschutz in Kernkraftwerken mit Leichtwasserreaktoren (allgemeine und fallbezogene Anforderungen), Fassung 06/2000, Juni 2000, <http://www.kta-gs.de/>
- /KTA 05/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA)
Sicherheitstechnische Regel des KTA: KTA 3601 Lüftungstechnische Anlagen in Kernkraftwerken, Fassung 11/05, November 2005, <http://www.kta-gs.de/>

- /LES 08/ Le Saux, W., H. Pretrel, C. Lucchesi, P. Guillou
 Experimental Study of the Fire Mass Loss Rate in Confined and Mechanically Ventilated Multi-Room Scenarios, IAFSS, Proceedings of the Ninth International Conference, 2008, S. 943 - 954;
www.iafss.org/publications/fss/9/943/view
- /MUS 91/ Muschelknautz, Linde AG
 Auswirkungen von Gaswolkenexplosionen auf die Umgebung, in: Berichte zum Vollzug der Störfall-Verordnung, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, April 1991
- /NEA 13/ Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency (NEA), Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI)
 OECD FIRE Project - Topical Report No. 1, Analysis of High Energy Arcing Fault (HEAF) Fire Events, Paris, France, June 2013, <http://www.oecd-nea.org/documents/2013/sin/csni-r2013-6.pdf>
- /NEN 02/ DiNenno, P. J., D. Drysdale (Hrsg.)
 Tabellenanhang, in: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, Quincy, MA, USA 2002
- /PEA 12/ Peacock, R. D., T. G. Cleary, P. A. Reneke, D. C. Murphy
 A Literature Review of the Effects of Smoke from a Fire on Electrical Equipment, NUREG/CR-7123, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD, USA, Juli 2012
- /PUR 02/ Purser, D. A.
 Toxicity Assessment of Combustion Products, in: DiNenno, P. J., et al. (Hrsg.); The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, Quincy, MA, USA, 2002, S. 2-83 - 2-171
- /ROE 11/ Röwekamp, M, B. Forell, S. Katzer, J. Klindt
 Weiterführende Untersuchungen zum hochenergetischen Versagen elektrischer Einrichtungen mit sicherheitstechnischer Bedeutung in Kernkraftwerken, GRS-A-3630, September 2011

- /RSK 96/ Reaktorsicherheitskommission (RSK)
RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren, 3. Ausgabe vom 14. Oktober 1981 (BAnz 1982, Nr. 69a) mit den Änderungen: in Abschn. 21.1 (BAnz 1984, Nr. 104), in Abschn. 21.2 (BAnz 1983, Nr. 106) und in Abschn. 7 (BAnz 1996, Nr. 158a) mit Berichtigung (BAnz 1996, Nr. 214), 4.1, RS-Handbuch, Stand 12/98, 1996,
http://www.bfs.de/de/bfs/recht/rsh/volltext/4_Relevante_Vorschriften/4_1_RSK_Leitlinien.pdf
- /RSK 11/ Reaktorsicherheitskommission (RSK)
Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan)
RSK-Stellungnahme 11. – 14.05.2011 (437. RSK-Sitzung), 2011,
http://www.rskonline.de/downloads/rsk_sn_sicherheitsueberpruefung_2011_0516_hp.pdf
- /WEN 13/ Western European Nuclear Regulators' Association (WENRA) Reactor Harmonization Working Group (RHWG)
Position paper on Periodic Safety Reviews (PSRs) taking into account the lessons learnt from the TEPCO Fukushima Dai-ichi NPP accident, Study by WENRA Reactor Harmonization Working Group, März 2013
http://www.wenra.org/media/filer_public/2013/04/05/rhwg_position_psr_2013-03_final_2.pdf

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de