

Ausbau und Aufbau von Fähigkeiten der GRS für den Spannungs- und Verteidigungsfall

Ausbau und Aufbau von Fähigkeiten der GRS für den Spannungs- und Verteidigungsfall

Fachlicher Abschlussbericht

Lorena Hentschel
Ilka Petermann
Martin Sogalla

September 2025

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) unter dem Förderkennzeichen 3620S62591 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUKN übereinstimmen.

Deskriptoren

Kernwaffenexplosion, nukleare Gefahrenlage, Referenzszenarien, SEWD, Spannungsfall, Verteidigungsfall

Kurzfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die wissenschaftliche Kompetenz der GRS, insbesondere des Team Strahlenschutz des GRS-Notfallzentrums, auf dem Fachgebiet der radiologischen Gefahrenlagen im Zusammenhang mit Nuklearwaffen und Angriffen auf kerntechnische Anlagen auszubauen und zu stärken. Mit dem durchgeführten Forschungsvorhaben wurde das Wissen auf dem Gebiet des Strahlen- und Notfallschutzes im Zusammenhang mit nuklearen Ereignissen im Interesse und zur Information der Öffentlichkeit ausgebaut.

Das GRS-Notfallzentrum ist Teil des Radiologischen Lagezentrums des Bundes (RLZ-Bund), dessen Kopfstelle beim Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) liegt. Das Team Strahlenschutz des GRS-Notfallzentrums hat die Aufgabe, bei überregionalen Notfällen die radiologische Situation sowie eingetretene oder potenzielle Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umwelt zu bewerten. Zur Wahrnehmung seiner Aufgaben im GRS-Notfallzentrum stützt es sich im Wesentlichen auf seine Fachkompetenz, die bislang im Rahmen verschiedener Vorhaben zur Analyse möglicher radiologischer Freisetzungen im Ereignisverlauf und zum Notfallschutz aufgebaut und weiterentwickelt wurde. Mit den gewonnenen Erkenntnissen dieses Forschungsvorhabens kann die GRS zudem bei der Erstellung des radiologischen Lagebildes (RLB) zur Bewertung auch von unvorhergesehen Entwicklungen und schnellen Ereignisabläufen zeitnah beitragen.

Im Allgemeinen Notfallplan des Bundes (ANoPI-Bund) nach § 98 Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) sind auf Grundlage von Gefährdungsanalysen Referenzszenarien festgelegt, die als Grundlage für die Notfallreaktion des Bundes und der Länder dienen. Einige dieser Referenzszenarien umfassen radiologische Gefahrenlagen durch Angriffe auf kerntechnische Anlagen sowie Kernwaffenexplosionen. Zu möglichen Freisetzungsmechanismen dieser Szenarien liegen punktuell Analysen der GRS vor. Für den Ausbau einer umfassenden und tragfähigen Basis zur Bewertung der radiologischen Lage bei Nuklearwaffenexplosionen und Angriffen auf kerntechnische Anlagen wurde der Stand von Wissenschaft und Technik aufgearbeitet, mögliche Ereignisabläufe und Freisetzungsmechanismen untersucht sowie die Wissensbasis in Bezug auf radiologische Gefahrenlagen und eine daraus resultierende mögliche Notfallreaktion erweitert.

Abstract

The research project had the objective to enhance the competence of the GRS, in particular the team „Radiation Protection“ of the GRS emergency response center, in the field of radiological hazard situations related to nuclear weapons and attacks on nuclear facilities. This expanded the knowledge in the field of radiation protection and emergency preparedness and response in connection with nuclear events, in the interest and for the information of the public.

The GRS emergency response center supports RLZ-Bund, headed at the Federal Ministry for the Environment, Climate Action, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMUKN). The team “Radiation Protection” of the GRS emergency response center is responsible for the assessment of the radiological situation as well as actual or potential releases of radioactive substances into the environment in case of national emergencies. To fulfil its tasks, the GRS emergency response center mainly relies on its expertise, which has so far been established and developed within the scope of various projects concerning the analysis of possible radiological releases and on emergency preparedness. The knowledge gained in this project also enables the GRS to contribute promptly to the development of the radiological situational report, including the assessment of unforeseen developments and rapid event progressions

In the General Emergency Plan of the Federation (ANoPI-Bund) according to § 98 Radiation Protection Act (StrlSchG), reference scenarios are defined, based on hazard analyses which serve as a reference for the emergency response of the Federation and the Länder. Some of these reference scenarios include radiological hazard situations due to attacks on nuclear facilities and nuclear weapon explosions. GRS analyses on possible release mechanisms of these scenarios are available on a selective basis. For the development of a comprehensive and sustainable foundation for the assessment of the radiological situation in case of nuclear weapon explosions and attacks on nuclear facilities, the state of the art in science and technology was reviewed and possible events and release mechanisms were investigated to expand the knowledge regarding radiological hazard situations and necessary emergency response.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung.....	I
	Abstract	III
1	Einleitung	1
2	Stand von Wissenschaft und Technik.....	3
2.1	Aufgaben des GRS-Notfallzentrums und des Teams Strahlenschutz.....	3
2.2	Radiologisches Lagezentrum des Bundes, Referenzszenarien des allgemeinen Notfallplans des Bundes	5
2.3	Sicherheit und Sicherung hinsichtlich nuklearer Gefahrenlagen.....	8
2.3.1	Sicherheitspolitik in Deutschland	8
2.3.2	Internationale Untersuchungen	12
2.3.3	Weltweites Kernwaffenarsenal und Kernmaterialinventar	16
2.4	Kernwaffen	25
2.4.1	Physikalische Grundlagen einer Kernwaffenexplosion.....	25
2.4.1.1	Druckwelle	28
2.4.1.2	Thermische Strahlung.....	28
2.4.1.3	Direktstrahlung	29
2.4.1.4	Fallout.....	29
2.4.1.5	Elektromagnetischer Impuls.....	32
2.4.2	Kernwaffentechnik	32
2.4.2.1	Kernwaffenmaterial.....	32
2.4.2.2	Kernspaltungswaffen (Fissionswaffen).....	33
2.4.2.3	Geboostete Fissionswaffen.....	35
2.4.2.4	Thermonukleare Waffen	35
2.5	Sicherung kerntechnischer Anlagen.....	37
3	Zusammenstellung von Ereignisabläufen und Freisetzungsmechanismen bei nuklearen Gefahrenlagen.....	41
3.1	Gefahrenlagen durch vorsätzliche Straftat im Zusammenhang mit radioaktiven Stoffen (ohne Kernspaltung)	41

3.1.1	Mutwillige Verteilung von radioaktivem Material in die Umwelt.....	41
3.1.2	Angriff oder Sabotageakt auf Transport mit radioaktiven Stoffen	44
3.2	Vorsätzliche Straftat, Störmaßnahme oder sonstige Einwirkung Dritter gegen oder auf eine kerntechnische Anlage	45
3.2.1	Kernkraftwerke	46
3.2.2	Forschungsreaktor	46
3.2.3	Zwischenlager	49
3.2.4	Landessammelstellen	51
3.2.5	Urananreicherungsanlage.....	52
3.2.6	Entwendung von Kernbrennstoffen.....	54
3.3	Gefahrenlagen durch Nuklearwaffen.....	56
3.3.1	Notfall beim Umgang mit einer Nuklearwaffe	56
3.3.2	Selbstbau und Explosion einer technisch einfachen, nuklearen Sprengvorrichtung	57
3.3.3	Einsatz gestohlener oder gekaufter Kernwaffen.....	58
3.3.4	Militärischer Einsatz von Nuklearwaffen.....	59
3.3.5	Abfangen einer Nuklearwaffe in der Luft	60
4	Ausbau der Wissensbasis und ergänzende Analysen.....	63
4.1	Radiologische Gefahrenlagen durch den Einsatz von Kernwaffen	63
4.1.1	Quelltermabschätzungen	63
4.1.2	Analysen zur Abschätzung relevanter Parameter zur Erfassung der radiologischen Lage.....	72
4.1.2.1	Sprengkraft und Wolkenabmessung	72
4.1.2.2	Wolkendurchzug	76
4.1.2.3	Dosis aus Direktstrahlung	77
4.1.2.4	Gesamtaktivität aus dem Fallout	79
4.1.2.5	Dosis aus dem Fallout	80
4.1.3	Notfallreaktion und Schutzmaßnahmen	82
4.2	Radiologische Gefahrenlagen durch militärische Angriffe auf kerntechnische Anlagen.....	99
4.2.1	Quelltermabschätzungen	101
4.2.2	Freisetzungen und radiologische Auswirkungen	105

4.2.3	Anlagenexterne Notfallreaktion und Schutzmaßnahmen.....	106
5	Erfassungsmöglichkeiten für das Team Strahlenschutz	107
5.1	Informationen von Betreibern, Behörden und Medien	107
5.2	Beobachtungen im Zusammenhang mit nuklearen Gefahrenlagen.....	109
5.3	Messsysteme.....	110
5.4	Analyse- und Prognosetools	113
6	Zusammenfassung	117
	Literaturverzeichnis.....	119
	Abbildungsverzeichnis.....	131
	Tabellenverzeichnis.....	133
	Abkürzungsverzeichnis.....	135

1 Einleitung

Die GRS unterstützt gemäß § 106 Strahlenschutzgesetz (StrSchG) das Radiologische Lagezentrum des Bundes (RLZ-Bund), dessen Kopfstelle beim Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) liegt. Das RLZ-Bund ist insbesondere bei überregionalen Notfällen für die Bewertung der radiologischen Lage verantwortlich. Im allgemeinen Notfallplan des Bundes nach § 98 StrlSchG (ANoPI-Bund) werden, aufbauend auf Bewertungen möglicher Notfälle im In- und Ausland, 16 Referenzszenarien beschrieben, die als Grundlage für die Notfallplanungen dienen.

Die Referenzszenarien umfassen auch radiologische Gefahrenlagen durch vorsätzliche Straftaten, Angriffe auf kerntechnische Anlagen sowie Kernwaffenexplosionen. Die Anforderungen an die zu entwickelnden Methoden und Analysewerkzeuge zur Bewertung der radiologischen Gefahrenlage werden von diesen Szenarien abgeleitet. Zu möglichen Freisetzungsmechanismen dieser Szenarien liegen punktuell Analysen der GRS vor. Für den Ausbau einer umfassenden und tragfähigen Basis zur Bewertung der radiologischen Lage besteht zusätzlicher Untersuchungsbedarf.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist der Ausbau der Kompetenz der GRS auf dem Gebiet der radiologischen Gefahrenlagen im Zusammenhang mit Nuklearwaffen und Angriffen auf kerntechnische Anlagen. Durch das Forschungsvorhaben soll gleichzeitig die Wissensbasis für die Arbeit des Notfallzentrums der GRS erweitert werden. Dadurch wird die Fähigkeit der GRS gestärkt, bei der Bewertung der radiologischen Lage und der Erstellung des radiologischen Lagebildes (RLB) auch bei unvorhergesehen oder bisher in der Planung nicht im Detail berücksichtigten Entwicklungen zeitnah und fundiert unterstützen zu können.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Aufgaben des GRS-Notfallzentrums und des Teams Strahlenschutz

Das GRS-Notfallzentrum beteiligt sich bei einem kerntechnischen Notfall im Rahmen der Notfallorganisationen des Bundes an der Erfassung und Bewertung des anlagentechnischen Zustandes sowie an der Prognose weiterer Entwicklungen. Die Aufgaben umfassen

- die Analyse des aktuellen Zustands der Anlage einschließlich der Verfolgung der ausgefallenen sowie der noch verfügbaren Sicherheitssysteme und Eingriffsmöglichkeiten der Betreiber und die Prognose des möglichen weiteren Verhaltens der Anlage,
- sofern möglich, die Bewertung der radiologischen Situation innerhalb der Anlage und sich daraus ggf. ergebender Einschränkungen von anlageninternen Handlungsmöglichkeiten,
- die Bewertung von eventuell anlagentechnischen Notfallmaßnahmen im Hinblick auf eine ggf. noch mögliche Beherrschung des Ereignisses oder im Hinblick auf Auswirkungen auf den Quellterm,
- die Analyse von etwaigen Freisetzungen radioaktiver Stoffe auf nicht vorgesehenen Pfaden im Hinblick auf Auswirkungen auf den Quellterm und
- eine Plausibilitätsbewertung des Quellterms im Hinblick auf den aktuellen Anlagenzustand.

Für das Notfallzentrum der GRS stehen Expertinnen und Experten verschiedener Fachstäben zur Verfügung. Kern des Notfallzentrums bilden Fachstäbe für Analyse, Systemtechnik und Strahlenschutz. Weitere Fachstäbe, z. B. für Anlagensicherung, Öffentlichkeitsarbeit oder internationale Kontakte können bei Bedarf kurzfristig hinzugezogen werden. Die Arbeit der Fachstäbe wird durch den Stab LK geleitet und koordiniert. Zusätzlich kann das GRS-Notfallzentrum auch auf alle weiteren Sachverständigen der GRS zurückgreifen, die nicht speziell dem Notfallteam zugeordnet sind. Aus dem GRS-Notfallzentrum heraus können zudem Verbindungspersonen z. B. zum BMUKN, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und zu weiteren Institutionen entsandt werden.

Das Notfallteam der GRS hat nach dem Reaktorunfall in Fukushima am 11. März 2011 über Wochen hinweg kontinuierlich über die Lage in der japanischen Anlage und die radiologischen Auswirkungen informiert und wirkt nach wie vor intensiv an der Erforschung der Unfallursachen und seiner Auswirkungen mit. Zwischen März und Juni 2011 erstellte die GRS dazu über 200 Berichte. Erkenntnisse zum Reaktorunfall in Fukushima werden regelmäßig veröffentlicht, z. B. in Form von gedruckten Berichten (siehe z. B. /BÜT 12/, /GRS 24/). Zwischenzeitlich wurde auch eine eigene Informationsseite zum Reaktorunfall in Fukushima auf der Homepage der GRS geschaltet, anlässlich des 12. Jahrestages veröffentlichte die GRS einen Überblick über die aktuellen Arbeiten am Standort. Die Erfahrungen mit Fukushima bildeten für die GRS den Anstoß dafür, ihre Notfallorganisation zu optimieren und ein dediziertes Notfallzentrum an ihrem Hauptsitz in Köln zu bauen.

Die GRS erstellt keine eigene Darstellung der Situation parallel zur Arbeit des zuständigen radiologischen Lagezentrums auf Bundes- oder Landesebene. Die Analysen der GRS bauen vielmehr auf den vorliegenden Lageinformationen und Bewertungen auf. Von Bedeutung für die Analysen der GRS sind vor allem die vorhandenen anlagentechnischen Lageinformationen zum Zustand der Anlage in Bezug auf die Schutzziele, Kontrolle der Reaktivität, Kühlung der Brennelemente und den Einschluss der radioaktiven Stoffe sowie zu Aussagen zum möglichen bzw. Angaben zum tatsächlichen Freisetzungspfad.

Diese Informationen werden für das RLZ-Bund aufbereitet, in Bezug auf Belastbarkeit, mögliche Lücken, Unsicherheiten und Inkonsistenzen geprüft, soweit möglich durch vertiefte Analysen zum Unfallablauf präzisiert und soweit möglich ergänzt und fortgeschrieben (z. B. durch erweiterte Untersuchungen zu Entwicklungsmöglichkeiten, Ausbau von Prognosen), um z. B. evtl. noch vorhandene Handlungsoptionen für anlageninterne Notfallmaßnahmen oder verbliebene Systeme zur Verhinderung oder Verringerung einer möglicherweise bevorstehenden Freisetzung aufzuzeigen.

Bei einem auslegungsüberschreitenden Unfall stellt sich auch die Frage, inwiefern die anlageninternen Handlungsmöglichkeiten durch die dann herrschenden radiologischen Bedingungen in der Anlage beeinflusst werden. Zur Einschätzung des Anlagenzustandes und der Prognose der weiteren Entwicklung ist in diesem Zusammenhang auch eine Analyse der radiologischen Situation in der Anlage erforderlich, die vom Team Strahlenschutz des Notfallzentrums der GRS vorgenommen wird.

Das Team Strahlenschutz des GRS-Notfallzentrums analysiert Informationen zu bereits eingetretenen oder potenziellen Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umgebung. Für die Ermittlung des Quellterms ist bei einem Ereignisfall im Inland der Betreiber verantwortlich. Fällt dieser als Informationslieferant aus, ist die GRS in der Lage, im Rahmen der verfügbaren Anlageninformationen Quelltermabschätzungen vorzunehmen und zur weiteren Lagebilderstellung verfügbar zu machen. Diese Abschätzungen werden im Anforderungsfall vom Team Strahlenschutz in Zusammenarbeit mit den anderen Kernteams des GRS-Notfallzentrums vorgenommen.

Die seit dem Februar 2022 andauernden kriegesischen Auseinandersetzungen in der Ukraine haben bereits zu mehreren Situationen geführt, die eine Freisetzung von Radioaktivität oder eine zusätzliche Strahlenexposition aufgrund der Kampfhandlungen befürchten ließen. Hierzu zählen militärischen Aktivitäten in der Sperrzone um das havarierte Kernkraftwerk Tschernobyl sowie der Angriff russischer Truppen auf das Kernkraftwerk Saporischschja. In diesem Zusammenhang hat die GRS, einschließlich des Notfallteams Strahlenschutz, Analysen zu Einschätzungen zu potenziellen Freisetzungen durchgeführt.

Die eruierten Erfassungsmöglichkeiten des Teams Strahlenschutz für die radiologische Lagebewertung der in diesem Vorhaben identifizierten und analysierten Freisetzungsmechanismen in Bezug auf nukleare Gefahrenlagen werden in Kapitel 5 beschrieben.

2.2 Radiologisches Lagezentrum des Bundes, Referenzszenarien des allgemeinen Notfallplans des Bundes

Anfang 2014 wurde die EU-Richtlinie 2013/59/Euratom /CEU 14/ (EU Basic Safety Standards, EU BSS) erlassen. Diese Richtlinie war von den Mitgliedsstaaten binnen vier Jahren in nationales Recht umzusetzen. Im Zuge dessen wurden in Deutschland verschiedene Verordnungen und Gesetze (u. a. Strahlenschutzverordnung und Strahlenschutzvorsorgegesetz) in einem neuen Strahlenschutzgesetz zusammengefasst. In das Gesetz flossen auch Erkenntnisse und Erfahrungen aus dem Reaktorunfall in Fukushima ein, insbesondere wurden auch Empfehlungen der Strahlenschutzkommission (SSK) /SSK 15/ umgesetzt. Eine zentrale Empfehlung der SSK war es, ein nationales radiologisches Lagezentrum der Länder und des Bundes einzurichten. Gemäß § 106 StrlSchG nahm das RLZ-Bund am 1. Oktober 2017 seinen Betrieb auf. Das RLZ-Bund wird von

der Notfallorganisation des BMUKN geleitet und vom BfS, vom Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BASE), von der GRS sowie vom Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) unterstützt.

In den §§ 106 und 107 StrlSchG werden Einrichtung und Aufgaben des RLZ-Bund geregelt. Das RLZ-Bund sammelt, bewertet und dokumentiert verfügbare Daten zu dem Ereignis und fasst die gegenwärtige Situation und mögliche Prognosen nach § 108 StrlSchG im RLB zusammen. Das RLB wird vom RLZ-Bund an die an der Notfallreaktion beteiligten Behörden übermittelt und dient als Grundlage für Entscheidungen über erforderliche Schutzmaßnahmen.

Im ANoPI-Bund sind Referenzszenarien festgelegt und werden von Bund und Ländern bei ihren Planungen für eine wirksame Reaktion auf mögliche Notfälle innerhalb oder außerhalb des Bundesgebiets zugrunde gelegt. Im 2. Diskussionsentwurf des ANoPI-Bund /BMU 20/, der zu Beginn des Forschungsvorhabens aktueller Diskussionsstand war, wurden zehn Referenzszenarien entwickelt. Der Szenarienkatalog wurde im aktuell gültigen, im November 2023 in Kraft getretenen, ANoPI-Bund auf 16 Referenzszenarien erweitert. Diese sind in Tab. 2.1 zusammengefasst. Eine Beschreibung der Referenzszenarien findet sich in Anhang B des ANoPI-Bund.

Tab. 2.1 Referenzszenarien des Allgemeinen Notfallplans des Bundes /BMU 23/

Nr.	Bezeichnung des Referenzszenarios
S0	Notfall mit ungeklärtem Ursprung
S1	Notfall in einem deutschen Kernkraftwerk (vor Brennelementfreiheit)
S2	Notfall in einem Kernkraftwerk im grenznahen Ausland (in bis zu 100 km Entfernung von der deutschen Grenze)
S3	Notfall in einem Kernkraftwerk auf dem europäischen Kontinent (in mehr als 100 km Entfernung von der deutschen Grenze)
S4	Notfall in einem Kernkraftwerk außerhalb des europäischen Kontinents
S5	Notfall in einer ortsfesten Anlage oder Einrichtung im In- und Ausland mit besonderem Gefahrenpotenzial, die nicht unter S1 bis S4 fällt
S6	Notfall im Zusammenhang mit sonstigen Tätigkeiten nach § 4 StrlSchG oder vergleichbaren Tätigkeiten nach ausländischem Recht
S7	Transportunfall an Land (Straße, Schiene, Luft)
S8	Sonstiger Notfall mit radioaktiven Stoffen oder mit radioaktiven Kontaminationen
S9	Absturz eines Satelliten oder Raumfahrzeugs mit radioaktivem Material

Nr.	Bezeichnung des Referenzszenarios
S10	Notfall auf einem Oberflächengewässer
S11	Notfall auf oder in Meeresgewässern
S12	Vorsätzliche Straftat im In- und Ausland im Zusammenhang mit radioaktiven Stoffen ohne Bezug zu einer Einrichtung oder kerntechnischen Anlage
S13	Vorsätzliche Straftat, Störmaßnahme oder sonstige Einwirkung Dritter gegen oder auf eine Einrichtung oder kerntechnische Anlage
S14	Nuklearwaffenexplosion
S15	Sonstiger Notfall beim Umgang mit einer Nuklearwaffe

Im 2. Diskussionsentwurf des ANoPI-Bund wurde der „Spannungs- und Verteidigungsfall“ als ein Referenzszenario in Betracht gezogen. Darunter wurden Ereignisse verstanden, die sich beispielsweise auf den Angriff auf kerntechnischen Anlagen und auf den Einsatz von Nuklearwaffen beziehen. Der 2023 in Kraft getretene ANoPI-Bund /BMU 23/ sieht den sogenannten „Spannungs- und Verteidigungsfall“ – zumindest wortwörtlich – nicht mehr vor. Planung für radiologische Notfälle im Zusammenhang mit Spannungs- oder Verteidigungsfällen erfolgen in der Konzeption Zivile Verteidigung (KZV) und fallen in den Bereich des Zivilschutzes. Die Zuständigkeiten für den Zivilschutz liegen beim Bundesministerium des Innern (BMI) sowie beim Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), nicht beim BMUKN. Nichtsdestotrotz würde bei solchen Ereignissen auf die radiologische Expertise des RLZ-Bund zurückgegriffen werden und, soweit sich aus der KZV keine konkreten Regelungen ergeben, die Regelungen der Notfallpläne nach dem StrlSchG anwendbar sein (vgl. Rn. 7 ANoPI-Bund). Im ANoPI-Bund /BMU 23/ werden daher weiterhin Gefahrenlagen im Zusammenhang mit Nuklearwaffen und Angriffen auf kerntechnischen Einrichtungen in den Referenzszenarien S13 bis S15 beschrieben, stehen jedoch nicht mehr unter der Begrifflichkeit des Spannungs- und Verteidigungsfalls. Nähere Erläuterungen zum Zivil- und Katastrophenschutz in Deutschland finden sich in Kapitel 2.3.1.

Jedes der Referenzszenarien steht für eine Klasse von Ereignissen, die sich bezüglich ihrer Freisetzungsmechanismen und -verläufe unterscheiden. In Kapitel 3 wird zunächst die Bandbreite durch die Auswahl repräsentativer Ereignisabläufe erfasst. Die Auswahl der Ereignisabläufe wird unter der Maßgabe getroffen, die Heterogenität der zu berücksichtigenden Freisetzungsmechanismen ausreichend abzubilden. Die Beschreibungen der Ereignisabläufe umfassen dabei sowohl die Referenzszenarien S12 bis S14. Detaillierte Analysen zu Freisetzungsmechanismen und radiologischen Auswirkungen erfolgen in Kapitel 4. Das Referenzszenario S15 ist nicht Bestandteil weiterführender Analysen dieses Vorhabens. Für die ausgewählten Repräsentanten werden die bereits

für die Notfallschutzplanung in geeigneter Aufarbeitung verfügbaren Erkenntnisse zu Freisetzungsverläufen und Aspekten des Notfallschutzes mit den Referenzszenarien des ANoPI-Bund abgeglichen.

2.3 Sicherheit und Sicherung hinsichtlich nuklearer Gefahrenlagen

In diesem Kapitel werden Aspekte in Bezug auf die Sicherheit und Sicherung hinsichtlich nuklearer Gefahrenlagen dargestellt. In Kapitel 2.3.1 werden grundlegende Zusammenhänge der Sicherheitspolitik und daraus resultierende Notfallschutzkonzepte in Deutschland aufgezeigt. Internationale Organisationen, die sich mit nuklearen Sicherheits- und Sicherungsaspekten beschäftigen, werden in Kapitel 2.3.2 vorgestellt. Das Kapitel 2.3.3 gibt eine Übersicht über das weltweite Kernwaffenarsenal und -material.

2.3.1 Sicherheitspolitik in Deutschland

Weißbuch der Bundeswehr

Das Weißbuch der Bundeswehr ist das oberste sicherheitspolitische Grundlagendokument Deutschlands. Es nimmt eine strategische Standort- und Kursbestimmung für die deutsche Sicherheitspolitik vor. Damit ist es der wesentliche Leitfaden für die sicherheitspolitischen Entscheidungen und Handlungen der Bundesrepublik Deutschland. Es schafft einen konzeptionellen und inhaltlichen Rahmen und bietet Anknüpfungspunkte für weitere gesamtstaatliche und ressortspezifische Strategien.

Das 2016 erschienene Weißbuch trägt den Titel „Zur Sicherheitspolitik und zur Zukunft der Bundeswehr“ /BMVG 16/ und legt im Gegensatz zu den vorherigen Weißbüchern seinen Schwerpunkt auf die Sicherheitspolitik und weniger auf militärische Aspekte. Sicherheitspolitische Aufgaben erstrecken sich zwischen innerer und äußerer Sicherheit, beispielsweise im Kampf gegen Terrorismus, Angriffe auf kritische Infrastrukturen sowie Migrationsbewegungen. In dem 2016 erschienenen Weißbuch wird ein Augenmerk auf die Resilienz der Bundeswehr und der Gesellschaft gelegt.

Nach dem zuvor erschienenen Weißbuch im Jahr 2006 hat sich die nationale und internationale politische und sicherheitspolitische Lage stark verändert. Beispiel dafür ist der Arabische Frühling, der Kampf gegen den Islamischen Staat oder der Ukraine-Krieg. Aus diesem Grund wird die grundlegende Aufgabe der Bundeswehr wieder in der Landes-

und Bundesverteidigung, im Heimatschutz, im Einsatz der Bundeswehr im Inneren und erstmals bei der Cybersicherheit gesehen.

Die Bundeswehr ist ein wesentliches Instrument der deutschen Sicherheits- und Verteidigungspolitik. Ihr Auftrag leitet sich aus den verfassungsrechtlichen Vorgaben sowie aus Deutschlands Werten, Interessen und strategischen Prioritäten ab. Auftrag der Bundeswehr ist es u. a., im Rahmen des gesamtstaatlichen Ansatzes Deutschlands Souveränität und territoriale Integrität zu verteidigen und seine Bürgerinnen und Bürger zu schützen, sowie gemeinsam mit Partnern und Verbündeten zur Abwehr sicherheitspolitischer Bedrohungen für die offene Gesellschaft beizutragen.

Aus dem Weißbuch, den darin enthaltenen Werten und dem Selbstverständnis zur Sicherheitspolitik der Bundesrepublik Deutschland ergeben sich viele weitere Richtlinien und Leitfäden, beispielsweise die „Konzeption Zivile Verteidigung“ im Zivil- und Katastrophenschutz.

Konzeption Zivile Verteidigung

Die Konzeption Zivile Verteidigung (KZV) /BMI 16/ ist das konzeptionelle Basisdokument für die ressortabgestimmte Aufgabenerfüllung im Bereich der zivilen Verteidigung und zivilen Notfallvorsorge des Bundes. Die Konzeption beschreibt Zusammenhänge und Prinzipien und macht Vorgaben für die künftige Ausgestaltung der einzelnen Fachaufgaben.

Hierbei wird die Zivile Verteidigung weiterhin im Rahmen des geltenden Rechts und der bestehenden völkerrechtlichen wie auch europarechtlichen Verpflichtungen und Befugnisse geleistet werden. Für die Verteidigung einschließlich des Schutzes der Zivilbevölkerung hat der Bund nach Art. 73 Abs. 1 Nr. 1 Grundgesetz (GG) die ausschließliche Gesetzgebungskompetenz. Die Planung und Durchführung der Fachaufgaben auf dem Gebiet der Gesamtverteidigung werden vom BMVg und den übrigen Fachressorts jeweils eigenverantwortlich wahrgenommen. Die Zuständigkeit des BMI besteht in der unmittelbaren Verantwortung für die Aufgaben des Zivilschutzes und in der Koordinierung der ressortübergreifenden Angelegenheiten der Zivilen Verteidigung.

In diesem rechtlich-organisatorischen Rahmen hat die Zivile Verteidigung die Aufgabe, alle zivilen Maßnahmen zu planen, vorzubereiten und durchzuführen, die zur Herstellung und Aufrechterhaltung der Verteidigungsfähigkeit einschließlich der Versorgung und des

Schutzes der Bevölkerung erforderlich sind. Hierzu gehört u. a. auch, die Bevölkerung vor den im Verteidigungsfall drohenden Gefahren zu schützen (Zivilschutz).

Zivilschutz und Katastrophenschutz

In Deutschland versteht man unter Zivilschutz eine besondere Form des Bevölkerungsschutzes, der nur im Verteidigungs- oder Spannungsfall zum Einsatz kommt, und Aufgabe des Bundes ist. Er setzt den Eintritt des Verteidigungs-, Spannungs- oder Zustimmungsfalls voraus, also kriegerische Handlungen oder einen bevorstehenden kriegerischen Konflikt. Der Bund hat im Zivilschutz die ausschließliche Gesetzgebungskompetenz. Zur Durchführung der Maßnahmen im Zivilschutz greift der Bund auf die Einheiten und Einrichtungen des Katastrophenschutzes der Länder zurück, die hierfür ergänzend ausgestattet und ausgebildet werden. Aufgabe des Zivilschutzes ist der Schutz der Bevölkerung, ihrer Wohnungen und Arbeitsstätten, lebens- oder verteidigungswichtiger zivile Dienststellen, Betriebe, Einrichtungen und Anlagen sowie des Kulturguts vor Kriegseinwirkungen durch nichtmilitärische Maßnahmen /ZSKG 20/. Das BBK als Geschäftsbereichsbehörde des BMI übernimmt die Aufgaben des Zivilschutzes.

Der Zivilschutz unterscheidet sich vom Katastrophenschutz, welcher bei allen sonstigen, eine besondere einheitliche Führung behördlicherseits bedürfenden Großschadenslagen in Friedenszeiten greift. Im Katastrophenfall sind die Innenministerien der Länder als oberste Katastrophenschutzbehörden zuständig. Die Landkreise und kreisfreien Städte sind mit ihren Fachämtern untere Katastrophenschutzbehörden. Die operative Durchführung wie Erste Hilfe, medizinische Versorgung und Aufräumarbeiten erfolgt somit auf kommunaler Ebene. Die Kommunen erhalten Hilfe von haupt- und ehrenamtlichen Einsatzkräften des Technischen Hilfswerks, des Arbeiter-Samariter-Bunds Deutschland, des Deutschen Roten Kreuzes, der Malteser, der Johanniter, der Deutschen Lebens-Rettungs-Gesellschaft und des Deutschen Feuerwehrverbands /BMI 22/.

CBRN-Schutz

Ein Teilbereich des Zivilschutzes stellt der CBRN-Schutz dar (Chemisch, Biologisch, Radiologisch, Nuklear). Zur Bewältigung von CBRN-Schadensereignissen sind mehrere Teilfähigkeiten sicherzustellen und dabei die Vorgaben der „Rahmenkonzeption für den CBRN-Schutz (ABC-Schutz) im Bevölkerungsschutz“ zu berücksichtigen. Die Rahmenkonzeption basiert auf dem „Gesetz über den Zivilschutz- und die Katastrophenhilfe des

Bundes (ZSKG)“ vom 2. April 2009 und den „Katastrophenschutzgesetzen der Länder“ /BBK 16/.

Die Teilfähigkeiten umfassen die CBRN-Detektion, den persönlichen Schutz der Einsatzkräfte und Bevölkerung, den CBRN-Sammelschutz zur Verhinderung eines Eindringens von CBRN-Gefahrstoffen in Einrichtungen, die CBRN-Härtung als Schutz von Material und Infrastrukturen und Einrichtungen vor den Wirkungen von u. a. nuklearen Explosionen, sowie den gesundheitlichen CBRN-Schutz mit Sanitätsdienst, Krankenhausalarmplanung und Sanitätsmaterialbevorratung. Ein Sonderfall des CBRN-Schutzes ist der radiologische Schutz, also der Schutz vor den ereignisbedingten Effekten ionisierender Strahlung. Nukleare Ereignisse werden als Teilgruppe der radiologischen Ereignisse betrachtet. Ziele sind die Vermeidung schwerwiegender Gewebeschäden (unmittelbare Schäden an Geweben und Organen) sowie die Begrenzung des Risikos stochastischer Effekte (spätere Wirkungen aufgrund von Schäden am Erbmateriale). Die Gefahrenabwehr durch den Katastrophenschutz ist Aufgabe der Länder (landeseigene Verwaltung). Der Bund unterstützt und berät die Länder, insbesondere mit Empfehlungen der SSK, um eine einheitliche Aufgabenerfüllung zu gewährleisten /BBK 16/.

Die wachsende Verwundbarkeit der modernen Infrastruktur und die Ressourcenabhängigkeit moderner Gesellschaften bieten vielfältige Angriffspunkte. Die Verbreitung von Massenvernichtungswaffen und ihrer Trägersysteme, Konfliktführung mit terroristischen Mitteln und Angriffe im Cyberraum können zu einer direkten Bedrohung Deutschlands und seiner Verbündeten werden. Insgesamt ist zu erwarten, dass die Wechselwirkungen von innerer und äußerer Sicherheit weiter zunehmen. Entsprechend den beschriebenen Angriffsmitteln und Angriffszielen konzentrieren die Bundesressorts ihre Fachplanungen im Bereich der Zivilen Verteidigung auch auf Einsatz von CBRN-Gefahrstoffen sowie von Massenvernichtungswaffen und ihren Trägersystemen /BMI 16/.

Verteidigungs- und Spannungsfall

Der Verteidigungsfall kann vom Bundestag mit Zweidrittelmehrheit festgestellt werden, wenn das Bundesgebiet mit Waffengewalt angegriffen wird oder ein solcher Angriff unmittelbar droht. Die Feststellung erfolgt auf Antrag der Bundesregierung, bedarf der Zustimmung des Bundesrats und ist vom Bundespräsidenten im Bundesgesetzblatt zu verkünden (siehe Art. 115 a GG). In Ausnahmefällen, d. h. bei unüberwindlichen Hindernissen oder Beschlussunfähigkeit des Bundestags, kann die Feststellung vom Gemeinsa-

men Ausschuss getroffen werden. Während des Verteidigungsfalls sind die Gesetzgebungskompetenzen des Bundes erweitert und das Gesetzgebungsverfahren vereinfacht, die Befehls- und Kommandogewalt über die Streitkräfte geht auf den Bundeskanzler über, die Bundesregierung kann Einheiten der Bundespolizei im ganzen Bundesgebiet einsetzen und Landesorganen Weisungen erteilen.

Vor Eintritt des Verteidigungsfalls kann der Bundestag den Spannungsfall feststellen. Damit werden die Gesetze zur Erhöhung der Verteidigungsbereitschaft und zur Sicherstellung der Versorgung von Streitkräften und der Zivilbevölkerung angewendet (siehe Art. 80 a GG).

Bei einem Spannungs- und Verteidigungsfall, auch im Sinne des Referenzszenarios S14 „Nuklearwaffenexplosion“, bedürfen sowohl Alarmierungswege als auch die Durchführung von Maßnahmen bei der Notfallreaktion eine komplexe Abstimmung auf Bundes-, Landes- und kommunaler Ebene. Das RLZ-Bund kann in diesem Fall bei der Erfüllung seiner Aufgaben zur Weitergabe von Informationen, der Bewertung der radiologischen Lage und von Empfehlungen für Maßnahmen im Austausch mit verschiedenen Ressorts von Bund und Ländern sowie mit weiteren Stellen und Organisationen in Kontakt stehen.

2.3.2 Internationale Untersuchungen

International Atomic Energy Agency

Der internationale Rechtsrahmen für die nukleare Sicherung besteht aus Rechtsinstrumenten und anerkannten Grundsätzen, die darauf abzielen, kriminelle und andere unbefugte Handlungen zu verhindern. Die allgemeine Einhaltung dieser Instrumente und harmonisierte nationale Rechts- und Regulierungsrahmen können einen wichtigen Beitrag zur Bekämpfung des Nuklearterrorismus¹ leisten. Die International Atomenergie Organisation (IAEA) informiert und berät die Staaten über die einschlägigen internationalen Rechtsinstrumente und ermutigt sie, diesen beizutreten und sie umzusetzen /IAEA 22/.

¹ Der Begriff „Nuklearterrorismus“ ist nicht eindeutig definiert. Er kann verstanden werden als die Durchführung oder Androhung einer Gewalttat, bei der nukleare Waffen angewandt oder kerntechnische Anlagen angegriffen werden, um einen Zustand der Angst zu schaffen, Aufmerksamkeit zu erregen oder zu erpressen.

Die wichtigsten internationalen Rechtsinstrumente, die unter der Schirmherrschaft der IAEA angenommen wurden, sind das Übereinkommen über den physischen Schutz von Kernmaterial (Convention on the Physical Protection of Nuclear Material, CPPNM) und seine Änderung von 2005 /IAEA 21a/ sowie der Verhaltenskodex für die Sicherheit und Sicherung radioaktiver Strahlenquellen mit seinen ergänzenden Leitlinien.

Das CPPNM stellt – nach seiner Änderung im Jahr 2005 – einen rechtsverbindlichen Rahmen für den Schutz von Kernanlagen und -material bei der friedlichen Nutzung im Inland sowie der Lagerung und dem Transport für die Vertragsstaaten dar. Das Übereinkommen sieht auch eine erweiterte Zusammenarbeit zwischen und unter den Staaten in Bezug auf rasche Maßnahmen zur Auffindung und Wiederbeschaffung von gestohlenem oder geschmuggeltem Kernmaterial, zur Abschwächung der radiologischen Folgen von Sabotageakten und zur Verhütung und Bekämpfung damit zusammenhängender Straftaten vor.

North Atlantic Treaty Organization

Kernwaffen sind neben konventionellen Streitkräften und Raketenabwehrsystemen ein zentraler Bestandteil der Gesamtkapazitäten der North Atlantic Treaty Organization (NATO) zur Abschreckung und Verteidigung. Die nukleare Abschreckung bildet seit der Gründung der NATO den Kern der gegenseitigen Sicherheitsgarantie. Die wichtigsten Grundsätze der Nuklearpolitik der NATO werden von den Staats- und Regierungschefs der 32 Mitglieder des Bündnisses festgelegt /NOR 22/.

Als Reaktion auf den Angriffskrieg Russlands gegen die Ukraine im Februar 2022 bekräftigten die Staats- und Regierungschefs der NATO auf dem Sondergipfel am 24. März 2022, dass die NATO ihre längerfristige Abschreckungs- und Verteidigungsposition erheblich stärken und das gesamte Spektrum einsatzbereiter Streitkräfte und Fähigkeiten ausbauen wird. Darüber hinaus verpflichteten sie sich zur einer verbesserten Vorsorge bezüglich chemischer, biologischer, radiologischer und nuklearer Bedrohungen. Diese Beschlüsse mündeten im Strategischen Konzept der NATO 2022 /NATO 22a/.

Das „NATO ATP-45: Warning and Reporting and Hazard Prediction of Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Incidents (Operators Manual)“ /NATO 14/ beschreibt Verfahren für Land-, Luft- und Seestreitkräfte bei CBRN-Gefahrenlagen. In dem Dokument werden sowohl Meldeverfahren für die Gefahrenabwehr beschrieben als auch Kon-

zepte dargestellt, um Vorhersagen von Gefahrenbereichen durch CBRN-Notfälle zu treffen, auch im Zusammenhang mit nuklearen Detonationen und radiologischen Angriffen und der daraus resultierenden Kontamination. Anhand von Graphen, Tabellen und Nogrammen können beispielsweise Abschätzungen zur Sprengkraft einer Nuklearwaffe, des Fallouts und radiologischer Kenngrößen wie Dosisleistung gemacht werden (siehe dazu auch Kapitel 4.1).

Stockholm International Peace Research Institute

Das Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) ist ein unabhängiges internationales Institut, das sich der Erforschung von Konflikten, Rüstung, Rüstungskontrolle und Abrüstung widmet. SIPRI stellt politischen Entscheidungsträgern, Wissenschaftlern, Medien und der interessierten Öffentlichkeit Daten, Analysen und Empfehlungen zur Verfügung, die auf offenen Quellen beruhen. Es unterhält Kontakte zu anderen Forschungszentren in der ganzen Welt und arbeitet auch eng mit mehreren zwischenstaatlichen Organisationen zusammen, insbesondere mit den Vereinten Nationen und der Europäischen Union.

Die jährlichen Berichte (SIPRI Yearbook) sind weltweit als maßgebliche und unabhängige Quelle für politische Entscheidungsträger, Wissenschaftler, Medien und der Öffentlichkeit zum Thema Rüstung, Abrüstung und internationale Sicherheit bekannt. Das Yearbook bietet einen Überblick über die Entwicklungen in den Bereichen internationale Sicherheit, Waffen und Technologie, Militärausgaben, Waffenhandel und -produktion sowie bewaffnete Konflikte und die Bemühungen um die Kontrolle konventioneller, nuklearer, chemischer und biologischer Waffen. Das Kapitel 10 „World nuclear forces“ der SIPRI Yearbooks ist frei zugänglich auf der Internetseite des Instituts /STO 22/.

Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization

Die Vorbereitungskommission für die Organisation des Vertrags über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen (Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, CTBTO) wurde im Jahr 1996 gegründet und hat ihren Sitz in Wien. Sie ist eine Interimsorganisation, deren Aufgabe es ist, das Verifikationsregime des Vertrags über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty, CTBT) in Vorbereitung auf das Inkrafttreten des Vertrags aufzubauen und die Universalität des Vertrags zu fördern /COM 22/.

Das CTBT wurde im Jahr 1996 zur Unterzeichnung aufgelegt und soll die Weiterverbreitung von Kernwaffen, sei es die Entwicklung von Kernwaffen durch Staaten, die derzeit keine besitzen, die Aufrüstung bestehender Kernwaffenarsenale oder die Schaffung neuer, fortschrittlicherer Generationen von Kernwaffen, verhindern. Es wurde bislang von 186 Ländern unterzeichnet und von 174 Ländern ratifiziert. Allerdings müssen 44 Länder, die über Nukleartechnologie verfügen, unterzeichnen und ratifizieren, bevor das CTBT völkerrechtlich in Kraft treten kann. Indien, Nordkorea und Pakistan haben den Vertrag noch nicht unterzeichnet.

Das Internationale Überwachungssystem (International Monitoring System, IMS) (siehe auch Kapitel 5) ist ein globales Netzwerk, das vier Technologien zur Detektion einsetzt:

- 170 Seismik-Stationen zur Überwachung von Schockwellen im Boden
- 11 Hydroakustik-Stationen zum Aufspüren von Schallwellen in den Ozeanen
- 60 Infraschall-Stationen zum Aufspüren von niederfrequenten Schallwellen
- 80 Radionuklid-Stationen und 16 Radionuklidlabore zur Überwachung und Identifizierung von radioaktiven Partikeln in der Atmosphäre

Rund 90 % der 337 IMS-Einrichtungen des Vertrags sind bereits in Betrieb. Das System konnte alle von Nordkorea gemeldeten Atomtests detektieren.

Das Internationale Datenzentrum am Hauptsitz der CTBTO in Wien empfängt die Daten der weltweiten Überwachungsstationen. Sie werden dort verarbeitet und an die CTBTO-Mitgliedstaaten verteilt. Die Mitgliedstaaten erhielten innerhalb von zwei Stunden Informationen über Ort, Ausmaß, Zeitpunkt und Tiefe der nordkoreanischen Atomtests.

Sobald das CTBT in Kraft tritt, können auf Antrag und mit Zustimmung der Mitgliedstaaten Inspektionen vor Ort durchgeführt werden, um Daten zu sammeln, die darauf hindeuten, dass ein Atomtest stattgefunden haben könnte.

Nuclear Threat Initiative

Die Nuclear Threat Initiative (NTI) ist eine gemeinnützige, unparteiische Organisation für globale Sicherheit, die sich auf die Verringerung nuklearer Bedrohungen konzentriert. Sie kollaboriert auch mit Regierungen und anderen Organisationen, um Strategien und

Konzepte zu entwickeln, um die Abhängigkeit von Atomwaffen zu verringern und ihre Verbreitung zu verhindern /NTI 22/.

Der NTI Nuclear Security Index ist ein Benchmarking-Projekt, das die Bedingungen für die nukleare Sicherheit in 175 Ländern untersucht. Der gemeinsam mit der Economist Intelligence Unit (EIU) erstellte NTI-Index wurde erstmals im Jahr 2012 veröffentlicht und hat internationale Diskussionen über die zur Stärkung der Sicherheit erforderlichen Prioritäten ausgelöst. Er bewertet anhand eines Kriterienkatalogs die Sicherung von Kernmaterial (hochangereichertes Uran und Plutonium), die Sicherung von kerntechnischen Anlagen im Hinblick auf mögliche Sabotageakte sowie die Bemühungen um globale Unterstützung zur nuklearen Sicherheit und Sicherung. Der NTI-Index stellt somit ein Instrument zur Verfolgung der Fortschritte im Bereich der nuklearen Sicherheit und Sicherung dar /NTI 20/.

2.3.3 Weltweites Kernwaffenarsenal und Kernmaterialinventar

Die Sicherung von radioaktivem Material und der damit verbundenen Technologien hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Nicht zuletzt haben die Ereignisse des 11. Septembers 2001 zu einer raschen und dramatischen Neubewertung der Risiken des (auch nuklearen) Terrorismus in all seinen Formen geführt. Auch der russische Angriffskrieg in der Ukraine im Februar 2022 mit der Besetzung von Kernkraftwerken und dem Einmarsch in die kontaminierte Sperrzone um den Standort Tschernobyl hat diese Sorgen in den Vordergrund des gesellschaftlichen Bewusstseins gerückt.

Die IAEA hat vier potenzielle Risiken für die nukleare Sicherheit kategorisiert /IAEA 19/,

- den Diebstahl einer Kernwaffe,
- den Erwerb von Kernmaterial für den Bau von Nuklearwaffen,
- die böswillige Verwendung radioaktiven Materials zur Verwendung als „schmutzige Bombe“ und
- die radiologischen Gefahren, die durch einen Angriff auf eine Anlage oder ein Transportfahrzeug oder durch Sabotage entstehen.

Diese Risiken, die von diesen Szenarien ausgehen, sind nicht identisch. Die Wahrscheinlichkeit, dass Tätergruppen in den Besitz eines nuklearen Sprengsatzes gelangen und diesen einsetzen, ist zwar relativ gering, kann aber nicht ausgeschlossen werden.

Eine schmutzige Bombe hat weitaus geringere radiologische Auswirkungen, aber die relative Zugänglichkeit zu Strahlenquellen macht es wahrscheinlicher, dass ein solches Ereignis eintreten könnte.

Die bestmögliche Prävention gegen den Diebstahl von Kernwaffen und Erwerb von spaltbarem Kernmaterial zum Bau von Kernwaffen wäre das Nichtvorhandensein. Die Wahrscheinlichkeit des Diebstahls von Kernwaffen sowie des Erwerbs von Kernmaterial hängt daher auch vom Vorkommen ab.

In Tab. 2.2 ist das geschätzte weltweite Kernwaffenarsenal im Jahr 2022 dargestellt. Die Zahlen beruhen auf Abschätzungen von Hans Kristensen und Matt Korda der Federation of American Scientists (FAS), federführende Experten auf diesem Gebiet. Ähnliche Werte für das Gesamtinventar einzelner Staaten sind auch im SIPRI Yearbook aus dem Jahr 2021 veröffentlicht worden /STO 21a/. Die Verfügbarkeit zuverlässiger Informationen über den Status der Atomwaffenarsenale und -fähigkeiten ist sehr unterschiedlich. Während Frankreich und Großbritannien einige Informationen offenlegen, weigert sich Russland, detaillierte Aufschlüsselungen bekannt zu geben. Dies gilt auch für die Regierung von Donald Trump in den USA. China gibt nur sehr wenige Informationen über Anzahl und zukünftige Entwicklungspläne heraus. Pakistan, Nordkorea und Israel machen keine Aussagen zum Umfang ihres Arsenal.

Tab. 2.2 Geschätztes Kernwaffenarsenal weltweit /KRI 22/

Staat	Strategisch und einsatzfähig	Taktisch und einsatzfähig	Reserve und nicht einsatzfähig	Militärischer Bestand	Gesamtinventar (Anteil am weltweiten Arsenal)
Russland	1.588	0 ¹	2.889	4.477	5.977 (0,48)
USA	1.644	100	1.964	3.708	5.428 (0,42)
China	0 ²	?	350	350	350 (0,03)
UK	120	n.a.	60	180	225 (0,01)
Frankreich	280	n.a.	10	290	290 (0,02)
Pakistan	0	n.a.	165	165	165 (0,01)
Indien	0	n.a.	160	160	160 (0,01)
Israel	0	n.a.	90	90	90 (0,01)
Nordkorea	0	n.a.	20	20	20 ³ (0,01)
	~ 3632	~ 100	~ 5.708	~ 9.440	~ 12.705

¹ Alle werden als zentral gelagert deklariert, obwohl sich einige Lagerstätten in der Nähe von Stützpunkten mit Einsatzkräften befinden können.

² China betrachtet alle seine Nuklearwaffen als strategisch. Das US-Militär bezeichnet seine Mittel- und Zwischenstreckenraketen als nicht strategisch.

³ Nach sechs Atomtests, darunter zwei mit 10 - 20 kt und einer mit mehr als 200 kt, schätzen die Autoren, dass Nordkorea genügend Spaltmaterial für etwa 40 Sprengköpfe produziert haben könnte. Die Anzahl der montierten Sprengköpfe für Mittelstreckenraketen schätzen die Autoren auf 20.

Kernwaffen „in Reserve und nicht einsatzfähig“ sind Sprengköpfe in Lagern, die eine gewisse Vorbereitung (z. B. Transport und Verladung auf Trägerraketen) erfordern würden, bevor sie voll einsatzfähig wären. Der „militärische Bestand“ umfasst einsatzfähige und nicht einsatzfähige Sprengköpfe, die sich in der Obhut des Militärs befinden und für die Verwendung vorgesehen sind. Das „Gesamtinventar“ umfasst sowohl die Sprengköpfe im militärischen Bestand als auch die ausgemusterten, aber noch intakten Sprengköpfe, für die eine Demontage vorgesehen sind. Zurzeit gibt es weltweit neun Atom-mächte, dazu zählen

- Russland,
- USA,
- China,
- Großbritannien,
- Frankreich,
- Pakistan,
- Indien,
- Israel und
- Nordkorea.

Pakistan, Indien, Israel und Nordkorea sind erklärte Atom-mächte außerhalb des Atom-waffensperrvertrags, der das Verbot der Verbreitung und die Verpflichtung zur Abrüstung von Kernwaffen sowie das Recht auf die friedliche Nutzung der Kernenergie zum Gegen-stand hat /BUN 20/. Zu Beginn des Jahres 2022 besaßen diese neun Staaten etwa 13.000 Kernwaffen, von denen ca. 3.600 einsatzfähig sind. Ungefähr 2.000 davon wer-den in hoher Alarmbereitschaft gehalten. Russland und die USA besitzen ca. 90 % aller Nuklearwaffen weltweit. /KRI 22/

Insgesamt ist der Bestand an nuklearen Sprengköpfen weiter rückläufig (Stand 2022, siehe auch Abb. 2.1). Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass die USA und Russland ausgemusterte Sprengköpfe abbauen. Der weltweite Abbau einsatzbereiter Sprengköpfe scheint zum Stillstand gekommen zu sein, aber ihre Zahl könnte laut SIPRI wieder ansteigen. Gleichzeitig laufen sowohl in den USA als auch in Russland umfang-reiche und kostspielige Programme zum Ersatz und zur Modernisierung ihrer nuklearen

Sprengköpfe, ihrer Raketen- und Flugzeugträgersysteme sowie ihrer Kernwaffenproduktionsanlagen /STO 21b/.

Nuklearwaffen werden grundsätzlich in zwei Arten unterteilt, strategische und taktische (oder nicht-strategische) Waffen. Die Begriffe werden von Staaten teilweise leicht unterschiedlich definiert. Laut /NATO 22b/ werden strategische Kernwaffen in der Regel als Waffen mit „interkontinentaler“ Reichweite (über 5.500 km) definiert. Zu den strategischen Kernwaffen gehören z. B. Langstreckenraketen, die mehrere Atombomben abwerfen können, ballistische Raketen auf U-Booten und Interkontinentalraketen. Taktische Kernwaffen haben eine entsprechend kürzere Reichweite. Mit ihnen kann gezielter angegriffen werden. Sie werden dort eingesetzt, wo sie eine viel größere Zerstörungskraft haben als konventionelle Waffen. Teilweise wird die Unterscheidung auch in Zusammenhang mit der Sprengkraft gebracht, wobei strategische Kernwaffen in der Regel eine Sprengkraft von über 300 kt TNT-Äquivalent aufweisen, taktische Kernwaffen von weniger als 300 kt. Die Tab. 2.3 listet Trägersysteme, deren Reichweite und Sprengkraft staatenweise auf. Alle Zahlen sind Näherungswerte und beruhen teilweise auf Einschätzungen der Autoren von /KRI 22/. Die Summen für strategische und taktische Streitkräfte sind auf die nächsten fünf Sprengköpfe aufgerundet. Die „Anzahl Sprengköpfe“ entspricht der Gesamtzahl der Sprengköpfe, die nuklearfähigen Trägersystemen zugeordnet sind. Nur ein Teil dieser Sprengköpfe ist auf Raketen und auf Flugzeugbasen stationiert. Weitere Einschränkungen und Erläuterungen sind /STO 20/ zu entnehmen.

Estimated Global Nuclear Warhead Inventories 1945 - 2022

Last updated: 2 March 2022

Hans M. Kristensen, Matt Korda, and Robert Norris, Federation of American Scientists, 2022

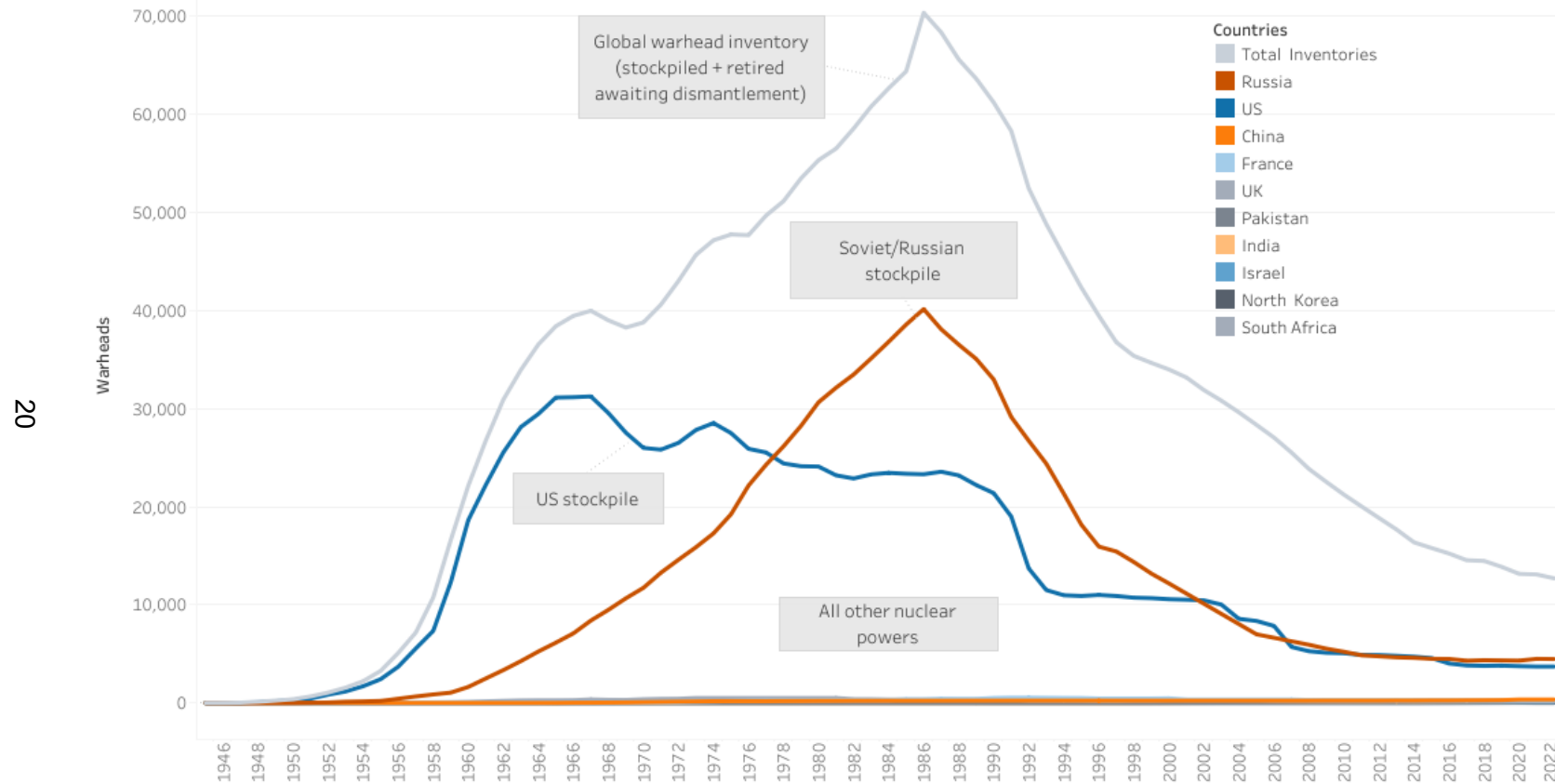


Abb. 2.1 Geschätztes weltweites Kernwaffeninventar von 1945 bis 2022 /KRI 22/

Tab. 2.3 Nukleare Streitkräfte weltweit, 2020 /STO 20/

Typ	Bezeichnung	Reichweite in km	Sprenkraft in kT	Anzahl Sprengköpfe
USA				3.800
<i>Strategisch</i>				3.570
Bomber	Stratofortress	16.000	5 - 150	528
	Spirit	11.000	360 - 1.200	320
ICBMs	Minuteman III	13.000	300 - 335	800
SLBMs	Trident II	> 12.000	8 - 455	1.920
<i>Taktisch</i>				230
Mehrzweckkampfflugzeug	Strike Eagle	3.840	50 - 170	80
Mehrzweckkampfflugzeug	Falcon	3.200	50 - 170	110
Mehrzweckkampfflugzeug	Tornado	2.400	50 - 170	40
Russland				4.315
<i>Strategisch</i>				2.440
Bomber	Bear-H	6.500 - 10.500	-	448
	Blackjack	10.500 - 13.200	-	132
ICBMs	(...)	> 10.000	100 - 800	1.136
SLBMs	SS-N-18 M1 Stingray	6.500	50	48
	SS-N-23 M1	9.000	100	384
	SS-N-32	> 8.050	100	288

Typ	Bezeichnung	Reichweite in km	Sprengkraft in kT	Anzahl Sprengköpfe
<i>Taktisch</i>				
ABM	(u. a. Raketenabwehrsysteme)	30 - 500	10 - 350	382
Luftstreitkräfte	(u. a. Bomber und Jäger)	-	-	495
Landstreitkräfte	(u. a. Kurzstreckenraketen und Marschflugkörper)	350 - 2.350	10 - 100	90
Seestreitkräfte	(u. a. ASW und Torpedos)	-	-	905
China				320
<i>Strategisch</i>				320
Bomber	B-6	3.100	-	20
ICBMs	(...)	5.500 - 12.000+	3 - 300	172
SLBMs	CSS-NX-14	> 7.000	200 - 300	48
Sonstige gelagerte Sprengköpfe	-	-	-	80
UK				195
SLBMs	Trident II	> 7.400	100	195
Frankreich				290
Luftstreitkräfte	Rafale	2.000	< 300	50
SLBMs	M 51	> 6.000	100	240
Pakistan				160
Luftstreitkräfte	Mirage III/V	2.100	5 - 12	36
Landstreitkräfte	(...)	200 - 2.750	5 - 40	120

Typ	Bezeichnung	Reichweite in km	Sprenkraft in kT	Anzahl Sprengköpfe
Sonstige gelagerte Sprengköpfe	-	-	-	4
Indien				150
Luftstreitkräfte	Mirage 200H	1.850	-	32
	Jaguar IS	1.600	-	16
LBBM	(...)	250 - 5.000+	12 - 40	70
SLBMs	Dhanush	400	12	4
	K-15	700	12	12
Sonstige gelagerte Sprengköpfe	-	-	-	16
Israel			Nutzlast (kg)	90
Luftstreitkräfte	F-16I	1.600	5.400	30
LBBMs	Jericho II	1.500 - 1.800	750 - 1.000	25
	Jericho III	> 4.000	1.000 - 1.300	25
Nordkorea			Nutzlast (kg)	30 - 40
LBBMs	(...)	1.000 - 12.000	500 - 1.500	-
SLBMs	Bukkeukseong-3	1.900?	-	-

- : nicht verfügbar oder anwendbar, (...): unter diesen Typen fallen viele verschiedene Arten an Sprengköpfen oder Trägersystemen und werden hier nicht weiter spezifiziert, ICBM: intercontinental ballistic missile (> 5.500 km), SLBM: submarine-launched ballistic missile, LBBM: land-based ballistic missile, ASW: anti-submarine weapon, ABM: anti-ballistic missile

Das Rohmaterial für Kernwaffen ist spaltbares Material. Dies kann entweder hochangereichertes Uran (engl.: highly enriched uranium, HEU) oder Plutonium sein, das beispielsweise in Brennelementen in Kernkraftwerken über den Lebenszyklus der Brennstäbe generiert wird und abgetrennt werden kann. China, Frankreich, Russland, Großbritannien und die USA haben sowohl HEU als auch Plutonium für ihre Kernwaffen produziert, Indien und Israel hauptsächlich Plutonium, Pakistan hauptsächlich HEU, ist aber zunehmend in der Lage, Plutonium herzustellen. Nordkorea hat Plutonium für den Einsatz in Kernwaffen hergestellt, aber es wird angenommen, dass es auch HEU für Kernwaffen produziert. Alle Staaten mit einer zivilen Kernenergieindustrie sind grundsätzlich in der Lage, spaltbares Material zu produzieren /STO 21b/.

Das weltweite Inventar an HEU schätzt SIPRI auf ca. 1.330 Tonnen, abgetrenntes Plutonium in Militärbeständen auf ca. 220 Tonnen und in zivilen Lagerbeständen auf ca. 320 Tonnen. Zum Vergleich: Die kritische Masse für den Bau einer Kernwaffe, also der Masse, bei der eine selbsttragende Kettenreaktion aufrechterhalten werden kann, beträgt für U-235 ca. 50 kg und für Pu-239 ca. 10 kg. Die Tab. 2.4 listet das weltweite Inventar von HEU und Plutonium aus dem Jahr 2020 nach Staaten auf, wobei bei Plutonium nur der militärische Bestand dargestellt wird. Der größte Teil der angegebenen Bestände bezüglich Uran ist zu 90 bis 93 % angereichertes U-235. Diese Anreicherung gilt gewöhnlich als waffenfähig. Einschränkungen und weitere Erläuterungen können /STO 21a/ entnommen werden.

Tab. 2.4 Weltweites Vorkommen an hochangereichertem Uran und abgetrenntem Plutonium, 2020 /STO 21a/

Staat	Nationaler Bestand in Tonnen	Produktionsstatus
Hochangereichertes Uran (HEU)		
China	14	Gestoppt 1987 - 1989
Frankreich	30	Gestoppt 1996
Indien	5,2	Fortlaufend
Israel	0,3	Unbekannt
Nordkorea	Unklar	Unklar
Pakistan	3,9	Fortlaufend
Russland	678	Fortlaufend
UK	22,6	Gestoppt 1962

Staat	Nationaler Bestand in Tonnen	Produktionsstatus
USA	562	Gestoppt 1992
andere	~ 15	-
Gesamt	~ 1330	-
Staat	Bestand in Tonnen (militärisch)	Produktionsstatus (militärisch)
Plutonium		
China	2,9	Gestoppt 1991
Frankreich	6	Gestoppt 1992
Indien	0,62	Fortlaufend
Israel	0,98	Fortlaufend
Nordkorea	0,04	Fortlaufend
Pakistan	0,41	Fortlaufend
Russland	128	Gestoppt 2010
UK	3,2	Gestoppt 1995
USA	79,7	Gestoppt 1988
Gesamt	~ 220	-

2.4 Kernwaffen

In den folgenden Kapiteln werden die grundlegenden physikalischen Prinzipien einer Kernwaffendetonation und daraus resultierende abzuleitende Phänomene beschrieben (siehe Kapitel 2.4.1) sowie Aspekte der Kernwaffentechnik skizziert (siehe Kapitel 2.4.2). Die Angaben stützen sich insbesondere auf /GLA 77/.

2.4.1 Physikalische Grundlagen einer Kernwaffenexplosion

Bei einer Kernspaltung (Fission) spaltet sich ein Atomkern entweder spontan oder durch den Einfang eines Neutrons in mehrere Spaltfragmente. Dabei wird die Massendifferenz zwischen Mutternuklid und Spaltprodukten in Form von Energie freigesetzt. Als selbst-erhaltende Kettenreaktion bezeichnet man den Prozess, bei dem die bei einer Spaltung freigesetzten Neutronen eine zusätzliche Spaltung in mindestens einem weiteren Atomkern bewirken. Dieser Prozess läuft entweder kontrolliert (Kernreaktor) oder unkontrolliert (Kernwaffe) ab. Ist das Verhältnis zwischen erzeugten Neutronen der $n+1$ -ten Generation zur Anzahl der Neutronen in der n -ten Generation kleiner als 1, ist die Kettenreaktion nicht mehr selbsterhaltend und „erlischt“.

Nach beispielsweise zehn Generationen sind $2^{10} = 1024$ Spaltungen erfolgt, nach 80 Generationen etwa $6E+23$ (entspricht einem Mol) Spaltungen. Ein durch die Spaltung freigesetztes Neutron hat eine Geschwindigkeit v von ca. $E+07$ m/s (3 % der Lichtgeschwindigkeit). Die charakteristische Zeit t für eine Generation ist ungefähr die, die das Neutron benötigt, um den Durchmesser D der Kugel des Spaltmaterials zu durchqueren. Bei der kritischen Masse von Uran beträgt der Durchmesser ungefähr 10 cm. Daraus ergibt sich eine charakteristische Zeit von $t = \frac{D}{v} = E-08$ s. Für den vollständigen Explosionsprozess vergehen ca. 80 Generationen, also ungefähr eine Mikrosekunde.

Energieverteilung

Die nach sich ziehenden radiologischen und nicht radiologischen Effekte spielen sich auf unterschiedlichsten Zeitskalen ab und werden in Abb. 2.1 dargestellt. Während sich die o. g. Kettenreaktion innerhalb von Mikrosekunden vollzieht, benötigen die Prozesse der Ausbreitung und Ablagerung von radioaktiven Partikeln über Tage bis Wochen.

Anders als bei konventionellen (chemischen) Explosionen, bei denen Energie nach chemischer Umsetzung von Stoffen frei wird, wird bei Nuklearexplosionen Energie auf Grund von Kernprozessen und in einer sehr viel größeren Menge auf viel kleinerer Zeitskala freigesetzt. Für eine relativ große Detonation wird relativ wenig spaltbares Material benötigt. Aus diesen Gründen ist die Distribution der Energie bei Nuklearexplosionen und konventionellen Explosionen grundlegend verschieden. Bei nuklearen Explosionen entstehen sehr hohe Drücke und Temperaturen von mehr als einer Million Grad Celsius und dadurch heißes, komprimiertes Gas aus verschiedensten Stoffen, aus denen eine Kernwaffe aufgebaut ist. Die freigesetzte Menge an Energie wird als Sprengkraft (yield) bezeichnet und als TNT-Äquivalent angegeben. Die freigesetzte Energie tritt in verschiedenen Formen in Erscheinung (siehe Abb. 2.2). 50 % der Gesamtenergie, die durch die Detonation freigesetzt wird, macht bereits die Druckwelle aus. 35 % werden als thermische Energie freigesetzt, 15 % in Form von ionisierender Strahlung, wobei 5 % Direktstrahlung ausmachen, die unmittelbar bei der Spaltung von Atomkernen auftritt, und 10 % Fallout-Strahlung, die durch den radioaktiven Zerfall von kondensierten Partikeln aus Spalt- und Aktivierungsprodukten entsteht. Einzelheiten werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.



Abb. 2.1 Zeitskala der wichtigsten Effekte bei einer 10 kT Oberflächenexplosion /FEMA 21/

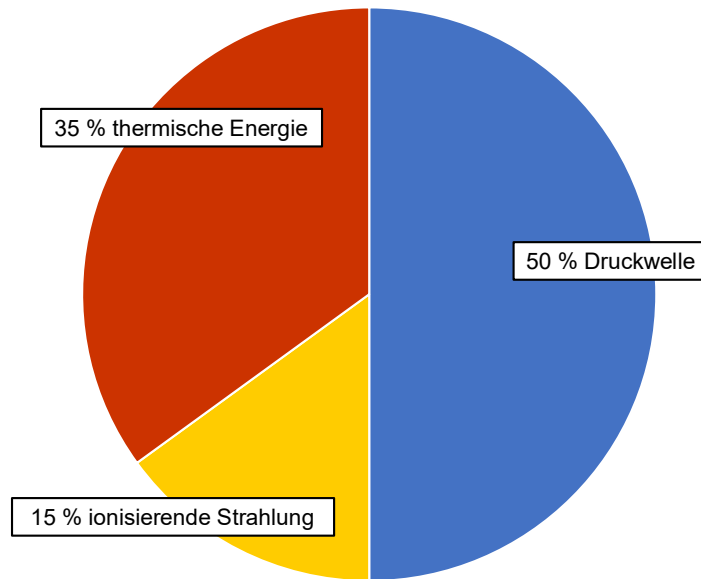


Abb. 2.2 Energieverteilung bei einer Kernwaffenexplosion (Fission)

2.4.1.1 Druckwelle

Aufgrund des hohen Drucks und der hohen Temperatur durch die Explosion wird eine Druckwelle ausgelöst, deren Front sich vom Detonationsort stetig wegbewegt. Die Schockwelle kann sich sowohl in Luft als auch in Festkörpern (z. B. Erdboden) und Flüssigkeiten (z. B. Wasser) ausbreiten. In Höhen über ungefähr 30 km ist die Dichte der Luft sehr gering, und die Bedeutung von Druckwellen nimmt mit der Höhe stetig ab. Der Anteil der Energie an der gesamten Spaltungsenergie beträgt ca. 50 %.

2.4.1.2 Thermische Strahlung

Die thermische Strahlung ist eine elektromagnetische Strahlung, deren Intensität und Spektrum von der Temperatur des Strahlers abhängen. Die thermische Energie ist abhängig von der vierten Potenz der Temperatur. Bei einer Nuklearexplosion, bei der eine Temperatur von einigen Millionen Grad Celsius herrscht, dominiert zu Anfang einer Explosion (~ Millisekunden) die thermische Strahlungsenergie mit einem Anteil von ca. 80 %. Die Folge ist eine starke Erwärmung der Umgebung und die darauffolgende Umwandlung in eine Schockwelle. Auf einer größeren Längen- und Zeitskala beträgt der Anteil der thermischen Strahlung an der gesamten Spaltungsenergie dann nur noch ca. 35 bis 45 %. Thermische Strahlung kann Hautverbrennungen oder Brände verursachen.

2.4.1.3 Direktstrahlung

Unmittelbar nach der Spaltung eines Kerns wird neben den zwei bis drei freigesetzten Neutronen auch Energie von der Größenordnung einiger Megaelektronenvolt (MeV) in Form von Gammastrahlung frei. Der Anteil der Direktstrahlung an der Gesamtenergie der ionisierenden Strahlung beträgt nur ca. 5 %. Während die freigesetzten schnellen Neutronen eine endliche Reichweite haben, zeigen Gammastrahlen eine theoretisch unendliche Reichweite auf. Dennoch werden sie aufgrund ihrer Wechselwirkung mit Teilchen in Luft, Boden oder Wasser in ihrer Intensität geschwächt, je länger ihr Weg durch das Material ist.

2.4.1.4 Fallout

Als diese Reststrahlung wird jene Strahlung bezeichnet, die auf die Spaltfragmente und auf das aktivierte Material durch den Kernzerfall zurückzuführen ist und am Boden sedimentiert. Die meisten der bei einer Kernspaltung von Uran oder Plutonium entstehenden Fragmente sind radioaktiv, d. h. sie befinden sich in einem energetisch ungünstigen Zustand und zerfallen spontan. Die Spaltfragmente sind zum größten Teil Betastrahler, entsenden daher Elektronen aber auch gleichzeitig Gammastrahlung. Spaltfragmente können sowohl in der Luft dispergiert sein und mit Winden weit fortgetragen werden als auch im näheren Umfeld zu Boden sinken und Kontaminationen verursachen. Da einige der Spaltfragmente große Halbwertszeiten aufweisen, existiert die nukleare Reststrahlung auch noch Jahre nach der Detonation. Der Anteil der Reststrahlung an der gesamten Spaltungsenergie beträgt ca. 10 %.

Die vier genannten Energieformen bilden zusammen die Gesamtenergie aus der Kernwaffenexplosion. Oft wird bei Kernwaffen die Explosionsenergie in Tonnen TNT-Äquivalent angegeben (beispielsweise haben 57 g spaltbares Material die gleiche Sprengkraft wie eine Kilotonne TNT). Diese Energie beschreibt jedoch nur die Summe aus Schockwelle, thermischer Strahlung und anfänglicher nuklearer Strahlung, nicht die des Fallouts.

Detonationshöhe bzw. Untergrundbeschaffenheit wirken sich sowohl qualitativ (Nuklidart) als auch quantitativ (Nuklidmenge) auf den lokalen Fallout aus (siehe Abb. 2.3).

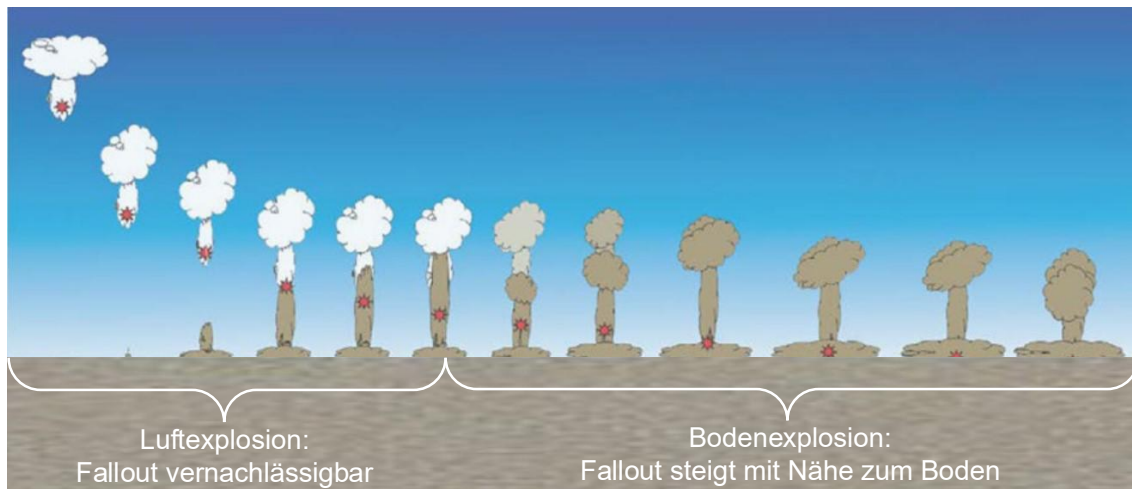


Abb. 2.3 Beispiele für Kernwaffenexplosionen für verschiedene Detonationshöhen bei einer Sprengkraft von 1 kT

Braune Wolken enthalten mehr Bodenschutt als weiße /SPR 20/.

Unterschiedliche Detonationshöhen weisen unterschiedliche physikalische Effekte und Auswirkungen auf:

- Höhenexplosion

Bei Explosionen in einer Höhe von mehr als ungefähr 30 km trägt die Energie von Schockwellen immer weniger zur Gesamtenergie der Explosion bei, da der Druck und die Dichte der Luft mit zunehmender Höhe immer kleiner werden. Zwischen ca. 30 und 40 km über der Erdoberfläche, wo die Schockwelle einen kleinen Beitrag zur Gesamtenergie leistet, wird die Energie, die in kleineren Höhen für die Schockwelle aufgebracht werden müsste, für die Erzeugung thermischer Strahlung verwendet. Oberhalb von ca. 40 km kommt der Umstand zum Tragen, dass die Luft so dünn ist, dass die Energie aus der Explosion über weitere Strecken transportiert wird und der Energietransport auf größeren Zeitskalen geschieht als bei bodennahen Explosionen. Durch die Direktstrahlung können Moleküle und Atome in der Atmosphäre ionisiert werden, wodurch es zu einem elektromagnetischen Impuls (EMP) kommen kann (siehe Kapitel 2.4.1.5).

- Luftexplosion

Luftexplosionen werden als Explosionen unterhalb einer Höhe von ca. 30 km definiert, wo die Luftdichte größer ist als in den darüber liegenden Schichten. Unterhalb dieser Höhe können freigesetzte Teilchen und elektromagnetische Strahlung zunehmend mit der Luft wechselwirken. Das Waffenmaterial nimmt Teilchen aus dem umgebenden Medium auf und formt zusammen mit diesen eine strahlende, heiße, meist

pilzförmige Masse, den Feuerball. Als Luftexplosion gilt sie nur dann, wenn der Feuerball die Erdoberfläche nicht berührt. Die thermische Strahlung reicht bei einer Sprengkraft von 1 MT TNT ca. 20 km weit und kann gravierende deterministische Hautschäden anrichten. Thermische Strahlung kann zum großen Teil durch opake Objekte absorbiert werden. Der Aufenthalt in Gebäuden oder sogar das Tragen der Kleidung können dabei als Schutzmaßnahmen dienen.

- Oberflächenexplosionen

Diese Art von Explosionen treten direkt an oder knapp über der Erdoberfläche auf. Abhängig von der freigesetzten Energie dominiert die Druckwelle mit einem erheblichen Anteil an der gesamten Spaltungsenergie. Da bei Explosionen mit Bodenkontakt Erdmaterial und Schutt mit aufgewirbelt werden, entstehen weitere Aktivierungsprodukte.

- Unterwasserexplosion

Bei nuklearen Explosionen unter Wasser bildet sich ein Feuerball, der jedoch kleiner ausfällt als bei Luftexplosionen mit gleicher Sprengkraft. Das Wasser in der Nähe der Explosion wird durch den Feuerball zum Leuchten gebracht. Die Leuchtkraft hält für einige tausendstel Sekunden an, verschwindet aber, sobald die Blase aus heißen, unter hohem Druck stehenden Gasen und Dampf, die den Feuerball bilden, die Wasseroberfläche erreicht. Zu diesem Zeitpunkt werden die Gase aus der Wasseroberfläche herausgetrieben und kühlen ab.

- Untergrundexplosion

Thermische Strahlung, Direktstrahlung und Druckwelle werden weitestgehend vom umgebenden Medium absorbiert und in Wärme umgewandelt, d. h. Wasser oder Boden heizen sich zunächst auf. Schockwellen können, je nachdem wie nah die Detonation an der Erdoberfläche ist, auch in luftgetragene Schockwellen übergehen. Elektromagnetische Strahlung und Neutronen können aus dem Medium austreten, weisen jedoch eine weitaus geringere Intensität auf als bei Explosionen in Luft. Wichtiger Faktor bei Unterwasser- und Untergrundexplosionen ist die Reststrahlung, da sich die entstandenen Spaltfragmente in Böden und Wasser ablagern und diese kontaminieren.

Die radiologischen Auswirkungen fallen bei bodennahen Explosionen aufgrund des erhöhten Fallouts am größten aus. Strukturelle Schäden (z. B. beschädigte Gebäude, Infrastruktur) können zur Beschreibung von Schadens-Zonen für die Einsatzplanung

verwendet werden. Dieser Zonenansatz kann vor allem in den ersten Stunden der Notfallreaktionen herangezogen werden, bis weitere Informationen, z. B. Messdaten wie Ortsdosisleistungen oder Nuklidzusammensetzungen aus dem lokalen Fallout, vorliegen und weitere Analysen anhand von Beobachtungen und eingehenden Informationen durchgeführt werden können (siehe dazu auch Kapitel 4.1).

2.4.1.5 Elektromagnetischer Impuls

Ein weiterer Effekt einer Nuklearexplosion ist der EMP, der elektrische Anlagen und Geräte in der Nähe der Detonation außer Betrieb setzen kann. Freigesetzte Gammastrahlung aus der Explosion ionisiert die Atome und Moleküle in der umgebenden Luft. Die leichteren freien Elektronen werden radial weiter nach außen beschleunigt, die schwereren positiv geladenen Atomrümpfe bleiben im Zentrum der Detonation. Es entsteht ein radiales elektrisches Feld. Wäre die Luftverteilung perfekt homogen, so würden Gammastrahlen perfekt radial emittiert werden und ein homogenes radiales elektrisches Feld entstünde, so dass keine elektromagnetische Nettoenergie übertragen würde. In Realität existieren jedoch immer Inhomogenitäten in der Luftdichte, was die Symmetrie des elektrischen Feldes bricht. Es entsteht ein zeitlich variierender Nettostrom an Elektronen. Senkrecht zu diesem wird elektromagnetische Strahlung emittiert, der EMP. Wie eine Radioantenne nehmen Metalle und elektrische Leiter diese Energie auf, wobei so große Spannungen und Ströme auftreten können, dass die Geräte und Bauteile zerstört werden. Dies könnte die Energieversorgung und Telekommunikation im umliegenden Gebiet stark beeinträchtigen.

2.4.2 Kernwaffentechnik

Verschiedene Techniken an Kernwaffen können unterschiedliche radiologische und nicht-radiologische Auswirkungen haben. Kernwaffen können dabei nicht nur die Kernspaltung als Energiefreisetzung nutzen, sondern auch die Kernfusion. Auch sind hybride Systeme in der Waffentechnik möglich. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über gängige Kernwaffentechnik und stellen relevante Unterschiede heraus.

2.4.2.1 Kernwaffenmaterial

Die benötigte Masse an spaltbarem Material, mit der die Kettenreaktion selbsterhaltend werden kann, wird als kritische Masse bezeichnet. Wie groß die kritische Masse eines

spaltbaren Materials ist, hängt u. a. von der Form des Materials, seiner Zusammensetzung und Dichte sowie dem Reinheitsgrad (z. B. der Anreicherung von Uran) ab.

Eine Kugel hat die kleinstmögliche Oberfläche für eine gegebene Masse und minimiert daher den Verlust von Neutronen, die für die Spaltung zur Verfügung stehen. Indem man das spaltbare Material mit einem geeigneten „Neutronenreflektor“ umgibt, kann man den Neutronenverlust verringern und die kritische Masse reduzieren. Ohne Neutronenreflektor beträgt die kritische Masse von U-235 ca. 50 kg, die von Pu-239 ca. 10 kg.

U-238 ist nicht für Kernwaffen geeignet. Es besteht eine recht hohe Wahrscheinlichkeit, dass ein einfallendes Neutron eingefangen und U-239 gebildet wird, anstatt eine Spaltung zu verursachen. U-235 hingegen hat eine höhere Spaltungswahrscheinlichkeit. Nur 0,7 % des natürlichen Urans besteht aus U-235, daher wird für Kernwaffen hochangereichertes Uran (> 80 %) benötigt. Pu-239 weist ebenfalls eine hohe Spaltwahrscheinlichkeit auf. Plutonium ist kein natürlich vorkommendes Element. Es entsteht im Laufe des Lebenszyklus von Brennelementen in Kernreaktoren durch die Absorption eines Neutrons durch U-238. Allerdings weist Pu-239 eine hohe Spontanspaltungsrate auf. Die Bombe könnte also detonieren, bevor sie beabsichtigt ist, zum Einsatz zu kommen.

2.4.2.2 Kernspaltungswaffen (Fissionswaffen)

Kanonenrohrtyp

Um eine Nuklearexplosion zu erzeugen, müssen unterkritische Massen spaltbaren Materials schnell in eine überkritische Konfiguration gebracht werden. Das einfachste Waffenkonzept ist die reine Spaltungskanone, bei der ein explosives Treibmittel verwendet wird, um eine unterkritische Masse durch ein „Kanonenrohr“ in eine andere unterkritische Masse zu schießen (siehe Abb. 2.2). In der Regel wird ein hohles Projektil auf einen Dorn geschossen, der das Loch in seinem Zentrum füllt. Plutonium kann nicht als spaltbares Material in einer Kanonenbaugruppe verwendet werden, da die Geschwindigkeit des Zusammenbaus in dieser Baugruppe zu klein ist, um die hohe Wahrscheinlichkeit auszuschließen, dass eine Kettenreaktion durch spontane Neutronenemission „vorinitiiert“ wird, wodurch die Spaltausbeute verringert wird. Daher werden Waffen aus hoch angereichertem Uran hergestellt. Die erforderliche Uranmenge beim Kanonenrohrtyp ist relativ groß und der Wirkungsgrad im Vergleich zum Implosionstyp geringer.

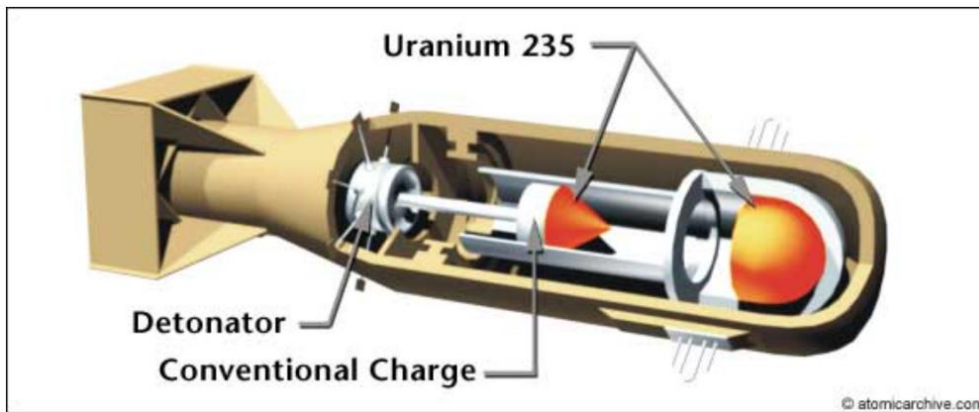


Abb. 2.2 Little Boy: Bombe vom Kanonenrohrtyp im 3D-Modell /ATO 22a/

Implosionstyp

Eine andere Bauweise ist der Implosionstyp, bei der eine unterkritische Masse aus spaltbarem Material durch einen chemischen Sprengstoff zu einer dichteren kritischen Masse komprimiert wird (siehe Abb. 2.4). Bei dem spaltbaren Material handelt es sich in der Regel um Plutonium, hochangereichertes Uran oder eine Mischung aus beidem. In der einfachsten Ausführung ist ein kugelförmiger Spaltstoffkern von einem Neutronenreflektor umgeben (auch Tamper genannt), der wiederum von chemischem Sprengstoff umgeben ist. Um eine bestimmte Spaltausbeute zu erzielen, wird für eine Implosionswaffe wesentlich weniger spaltbares Material benötigt als für einen Kanonenrohrtyp. Eine Implosionsspaltwaffe mit Neutronenreflektor mit einer Sprengkraft von einer Kilotonne kann mit nur 1 bis 2 kg Plutonium oder mit etwa 5 bis 10 kg hochangereichertem Uran gebaut werden.

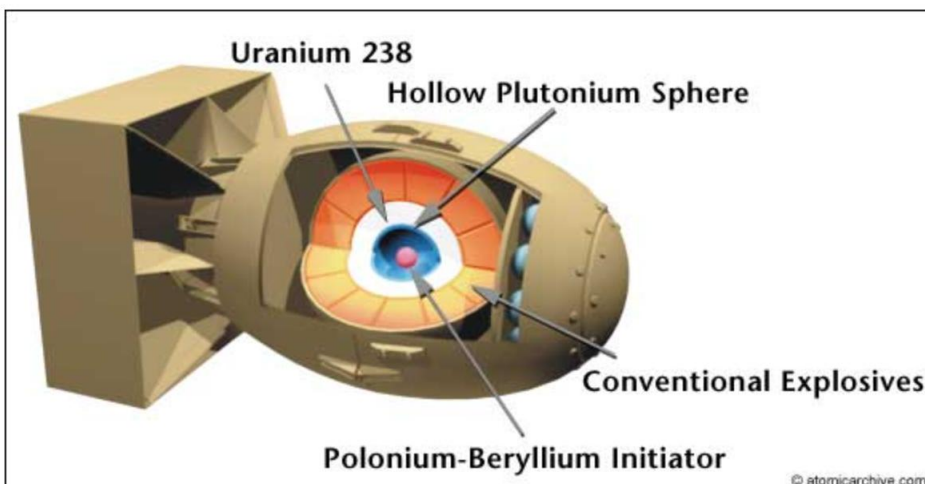


Abb. 2.4 Fat Man: Bombe vom Implosionstyp im 3D-Modell /ATO 22b/

2.4.2.3 Geboostete Fissionswaffen

Eine weitere Technik zur Erhöhung der Spaltausbeute ist das sog. Boosten. Dabei werden Fusionsreaktionen als Neutronenquelle genutzt, um Spaltungen mit einer viel höheren Rate zu induzieren, als dies mit Neutronen aus reinen Spaltungskettenreaktionen möglich wäre. Durch den hohen Druck und die hohe Temperatur im Zentrum wird ein Gemisch aus Tritium und Deuteriumgas komprimiert und erhitzt (siehe Abb. 2.3). Der Wasserstoff fusioniert und bildet Helium und freie Neutronen. Die bei dieser Fusionsreaktion freigesetzte Energie ist in der Gesamtbilanz in der Regel vernachlässigbar, aber jedes dieser Neutronen setzt eine neue Spaltungskettenreaktion in Gang. Durch das Boostern wird somit eine höhere Spaltausbeute erreicht.

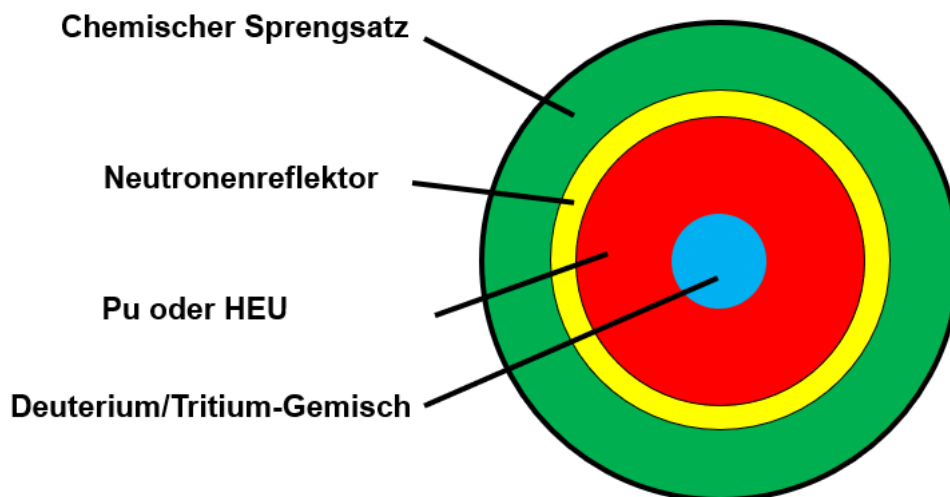


Abb. 2.3 Schematische Darstellung einer geboosteten Fissionswaffe

2.4.2.4 Thermonukleare Waffen

Eine thermonukleare Waffe nutzt sowohl die Kernfusion als auch die Kernspaltung zur Energiefreisetzung aus. Die Fusion ist nicht durch das Erfordernis einer kritischen Masse begrenzt, so dass diese Waffen eine theoretisch unbegrenzte Leistung erreichen können. Oft liegen sie in der Größenordnung von einigen Megatonnen TNT-Äquivalent. Für die Kernfusion sind jedoch höhere Temperaturen und eine größere Dichte erforderlich, als sie mit chemischen Sprengstoffen erreicht werden können, weshalb eine Kernspaltungsexplosion zum Einsatz kommt, um die erforderliche Temperatur und Dichte zu erzeugen. Das Ergebnis ist eine zweistufige Reaktion, bei der zuerst eine Kernspaltungsbombe explodiert und den sekundären, fusionierenden Teil der Waffe auslöst. Als Fu-

sionsmaterialien werden in der Regel Deuterium und Tritium verwendet, die unter Ausstrahlen eines Neutrons zu Helium fusionieren. Deuterium wird in Form von Lithiumdeuterid (Li-6-D) verwendet, das unter Neutronenbestrahlung auch das nötige Tritium erzeugt. Die Kernfusion erzeugt im Vergleich zur Kernspaltung viel weniger und kurzlebige Radioaktivität, nämlich nur Tritium. Tritium reagiert jedoch auch mit Deuterium und wird zum großen Teil „verbraucht“. Allerdings entstehen auch Spaltprodukte aus der Fission sowie aktivierte Produkte aus den Umgebungsmaterialien, die zusammen den Fallout bilden. Die Ausbeute einer thermonuklearen Waffe wird durch die Mengen an Li-6-D und zusätzlichen spaltbaren Materialien gesteuert. Dieses zusätzlich erzeugte spaltbare Material dominiert den radioaktiven Fallout.

Eine bekannte Ausführung einer thermonuklearen Waffe ist das sog. Teller-Ulam-Design (siehe Abb. 2.4). Dieses löst das Problem, dass die in der Fissionsstufe erzeugten Schockwellen sich zu langsam ausbreiten, um die Kompression der thermonuklearen Stufe zu ermöglichen, bevor die Bombe selbst detoniert. Um die für die thermonukleare Reaktion notwendigen hohen Temperaturen aufrechtzuerhalten, wird ein Material (Styropor) eingesetzt, das hochenergetische Gammastrahlen absorbiert. Während der Absorption der Strahlung werden fast im gleichen Moment radiale Kompressionskräfte entlang des gesamten Zylinders ausgeübt, so auch auf das Lithiumdeuterid. Gleichzeitig wird der komprimierte Lithiumdeuterid-Kern aufgrund der Reflektoren mit Neutronen beschossen, Tritium wird gebildet und der Fusionsprozess beginnt.

Aus den o. g. Gründen gibt es bislang keine realisierte reine Fusionswaffe.

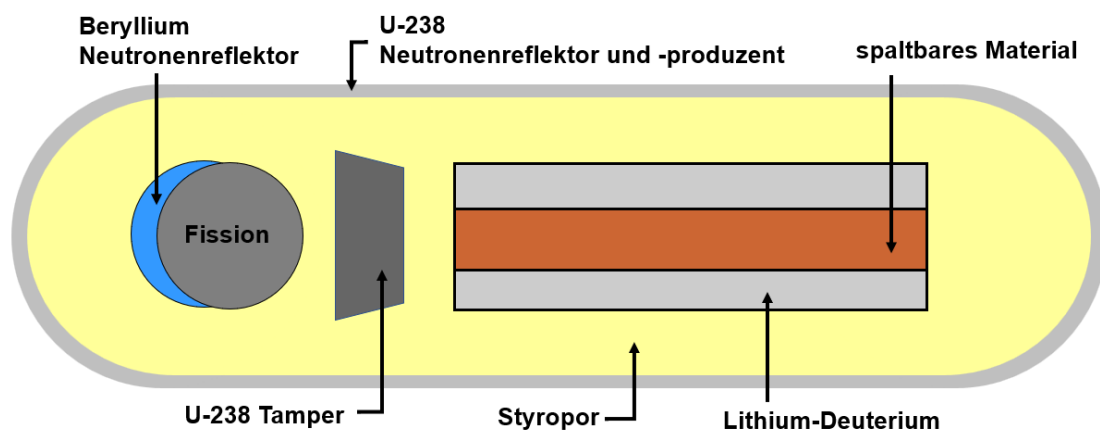


Abb. 2.4 Schematische Darstellung einer thermonuklearen Waffe nach /ATO 23/

2.5 Sicherung kerntechnischer Anlagen

Im Zusammenhang mit nuklearen Gefahrenlagen sind auch Szenarien denkbar, bei denen kerntechnische Anlagen angegriffen werden bzw. mutwillige Einwirkungen von außen erfahren, so dass eine nicht unerhebliche Freisetzung von radioaktiven Stoffen möglich ist.

Die Errichtung und der Betrieb einer kerntechnischen Anlage darf nach Atomgesetz (AtG) nur genehmigt werden, wenn der „erforderliche Schutz gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD)“ gewährleistet ist. Die Genehmigungsvoraussetzung gilt auch für den Transport sowie für die Lagerung bzw. Zwischenlagerung von Kernbrennstoffen.

Die Sicherung von kerntechnischen Anlagen erfolgt durch technische und personell-administrative Sicherungsmaßnahmen. Der erforderliche Schutz gegen Störmaßnahmen ist in den sog. SEWD-Richtlinien (für Leichtwasserreaktoren, Forschungsreaktoren, Zwischenlager und anderen) festgelegt. Der Schutz gegen SEWD ist dann gewährleistet, wenn folgende Schutzziele erreicht werden:

- Eine Gefährdung von Leben und Gesundheit infolge erheblicher Direktstrahlung oder infolge der Freisetzung einer erheblichen Menge radioaktiver Stoffe muss verhindert werden können.
- Eine einmalige oder wiederholte Entwendung von Kernbrennstoffen in Mengen, mit denen ohne Wiederaufarbeitung und Anreicherung die Möglichkeit der unmittelbaren Herstellung einer kritischen Anordnung gegeben ist, muss verhindert werden können.

Die erforderlichen Maßnahmen zur Sicherung einer kerntechnischen Anlage gegen SEWD richten sich nach den unterstellten Einwirkungen. Diese unterstellten Einwirkungen bestimmen die Auslegung einer Anlage. Kerntechnische Anlagen können nicht gegen alle denkbaren Einwirkungen gesichert werden. Daher konzentriert sich die Sicherung in Deutschland auf eine Basissicherung, die auf den unterstellten Einwirkungen, den Lastannahmen /BMU 24/, basiert. Diese werden in einer Richtlinie, die vom Bundesumweltministerium im Einvernehmen mit den zuständigen atomrechtlichen Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden erarbeitet wurde, festgelegt. Die Terroranschläge des 11. September 2001 hatten beispielsweise eine komplette Überarbeitung der Lastannahmen zu Folge. Die in den Lastannahmen /BMU 24/ definierten Hilfsmittel und

unterstellten Einwirkungen gelten für kerntechnische Anlagen und größtenteils auch für Transporte.

Verantwortlich für die Einhaltung der gesetzlichen und regelungs-technischen Vorschriften ist der Genehmigungsinhaber (z. B. Betreiber, Beförderer). Die Maßnahmen des Genehmigungsinhabers sind jedoch mit denen der staatlichen Schutzkräfte verzahnt.

Neben nationalen Regelungen zur Sicherung gegen SEWD sind auch internationale Empfehlungen, z. B. der IAEA zu beachten /INT 18/, /IAE 11/. Im September 2001 wurden von der IAEA die „Physical Protection Objectives and Fundamental Principles“ (Schutzziele und fundamentale Grundsätze des physischen Schutzes von Kernmaterial und kerntechnischen Anlagen) verabschiedet. Darin enthalten sind grundlegende Prinzipien der Sicherung, auf die sich die Vertragsstaaten geeinigt haben.

Die Maßnahmen zur Sicherung einer kerntechnischen Anlage sind die logischen Konsequenzen, die sich aus den Lastannahmen für eine ortsfeste kerntechnische Anlage ergeben. Aus diesen werden Maßnahmen abgeleitet, die die Einwirkung im Hinblick auf das Schutzziel unwirksam machen.

Das sog. „Integrierte Sicherungs- und Schutzkonzept“ ist von grundlegender Bedeutung für die Sicherung. Es legt den Grundsatz fest, dass Sicherungsmaßnahmen des Betreibers so beschaffen sein müssen, dass bis zum wirksamen Eingreifen der Polizei die Einhaltung der Schutzziele der Anlagensicherung für die unterstellten Lastannahmen gewährleistet ist. Sicherungsmaßnahmen des Betreibers und Schutzmaßnahmen des Staates werden aufeinander abgestimmt.

Die sicherheitstechnische Auslegung einer kerntechnischen Anlage kann bereits einen wesentlichen Beitrag zur erforderlichen Sicherung beitragen. Hierzu zählen u. a.

- die Auslegung gegen definierte Störfälle,
- die Redundanz und räumliche Trennung von Sicherheitssystemen,
- Maßnahmen gegen Flugzeugabsturz, Druckwellen aus chemischer Reaktion und Brände,
- die Betriebs- und Störfallinstrumentierung,

- die Maßnahmen des Strahlenschutzes, insbesondere Zugangsbeschränkungen und -kontrollen sowie
- die Maßnahmen der System- und Komponentenüberwachung durch Schichtrundgänge und wiederkehrende Prüfungen.

Sicherungsmaßnahmen sind zusätzlich in dem Umfang zu treffen, in dem die Auslegung und die sonstigen Sicherheitsvorkehrungen allein den erforderlichen Schutz gegen SEWD nicht gewährleisten können. Mit Hilfe von Sicherungs- und Entwendungspfadanalysen /BMU 03/ wird ermittelt, welche Bereiche, Systeme und Komponenten gesichert werden müssen, um die Schutzziele einzuhalten. Der erforderliche Umfang der Anforderungen und Maßnahmen wird unter Berücksichtigung des Gefahrenpotentials der Anlage bestimmt. Bei deren Festlegung ist eine effektive Folgedosis von 100 mSv bis zum 70. Lebensjahr als Summe von Inhalation und sieben Tagen äußerer Bestrahlung als Richtwert zugrunde zu legen. Die Berechnung erfolgt nach den in einer der SEWD-Richtlinien festgelegten Methoden /BMU 14/.

Übergeordnete Maßnahmen zur Sicherung von kerntechnischen Anlagen sind /BMU 98/, /IAEA 11/, /BMU 99/

- baulich-technische Barrieremaßnahmen mit einem „defence in depth“-Konzept,
- Kontroll-, Überwachungs- und Alarmierungsmaßnahmen wie Videoüberwachung und Zugangskontrollen,
- organisatorische und personelle Sicherungsmaßnahmen wie die Sicherung durch den Objektsicherungsdienst und der Zuverlässigkeitsüberprüfung des Personals sowie
- Maßnahmen für den polizeilichen Einsatz wie die regelmäßige Überprüfung der Kommunikationsverbindungen sowie umfassende Unterrichtung der Polizei über die örtlichen Verhältnisse.

Mögliche Ereignisabläufe im Zusammenhang mit Angriffen auf kerntechnische Einrichtungen werden in Kapitel 3 skizziert. Ergänzende Analysen zu einem ausgewählten Ereignisablauf werden in Kapitel 4.2 ausgeführt.

3 Zusammenstellung von Ereignisabläufen und Freisetzungsmechanismen bei nuklearen Gefahrenlagen

In diesem Kapitel werden mögliche Ereignisabläufe und Freisetzungsmechanismen im Zusammenhang mit nuklearen Gefahrenlagen zusammengestellt. Dieser Ereigniskatalog wird hinsichtlich seiner Freisetzungsmechanismen und Eigenschaften kategorisiert (siehe Kapitel 3.1, 3.2 und 3.3) und enthält sowohl Abläufe in Bezug auf Gefahrenlagen im Zusammenhang mit Nuklearwaffen, die den Referenzszenarien S14 und S15 zuzuordnen sind, als auch Ereignisse, die im Allgemeinen im Zusammenhang mit vorsätzlichen, mutwilligen Straftaten und SEWD stehen. Letztere werden den Referenzszenarien S12 und S13 zugeordnet.

In den folgenden Kapiteln werden die Ereignisabläufe kurz beschrieben, radiologische Auswirkungen ohne tiefergehende Detailanalysen eruiert und relevante Bedrohungsparameter skizziert. Für jeden der Ereignisabläufe werden bestehende Wissenslücken, insbesondere in Bezug auf die Beschreibung der für die Bewertung der radiologischen Auswirkungen relevanten Parameter, so weit wie möglich, herausgearbeitet.

Weiterführende Betrachtungen und ergänzende Analysen erfolgen für ausgewählte Ereignisabläufe im Zusammenhang mit Kernwaffen (siehe Kapitel 4.1) und Angriffen auf kerntechnische Anlagen (siehe Kapitel 4.2).

Die hier aufgeführten Ereignisabläufe basieren zum Teil auf bereits untersuchte Unfallszenarien und im ANoPI-Bund /BMUV 22/ aufgeführte Referenzszenarien sowie auf einem Szenarienkatalog des Federal Radiological Monitoring and Assessment Centers des U.S. Department of Homeland Security /FED 10/.

3.1 Gefahrenlagen durch vorsätzliche Straftat im Zusammenhang mit radioaktiven Stoffen (ohne Kernspaltung)

3.1.1 Mutwillige Verteilung von radioaktivem Material in die Umwelt

Kurzbeschreibung

Durch radiologische Dispersionsvorrichtungen (Radiological Dispersal Devices, RDD), auch als „schmutzige Bomben“ bekannt, wird mutwillig radioaktives Material verteilt. Der Einsatz von schmutzigen Bomben wird dem Referenzszenario S12 des ANoPI-Bund

zugeordnet und zunächst als regionaler Notfall eingestuft. RDDs sind so konzipiert, dass sie das radioaktive Material mit Hilfe eines konventionellen Sprengstoffs in die Umwelt verstreuen. Schmutzige Bomben haben in erster Linie eine psychologische Wirkung und sollen Angst und Schrecken verbreiten. Bei der Androhung eines Einsatzes als auch bei tatsächlicher Anwendung werden sowohl Katastrophenschutzmaßnahmen als auch weitere Schutzmaßnahmen (z. B. medizinische und psychologische Nachsorge) erforderlich sein.

Radiologische Auswirkungen

Ein Anschlag mit schmutzigen Bomben ist meist nicht vorhersehbar, so dass eine Analyse und Bewertung der radiologischen Lage erst nach Freisetzung erfolgen kann, außer die Menge der eingesetzten Radionuklide und die Sprengstoffmenge sind vorab bekannt, weil der oder die Täter den Einsatz bereits angedroht haben. Bei gleicher Masse gegenüber einer improvisierten Kernwaffe (vgl. Kapitel 3.3.2) beträgt die Explosionskraft einer RDD nur einen Bruchteil der einer improvisierten Kernwaffe. Die Auswirkungen (Zerstörung von Infrastruktur, Todesfälle) fallen im Vergleich zu Kernwaffen geringer aus. Bei einem Anschlag mit einer RDD wird es eine begrenzte Anzahl an Personen geben, die – je nach Art und Menge des radioaktiven Materials – gewissen, nicht vernachlässigbaren Strahlungsdosen ausgesetzt sind. Nach einer Explosion mit freigesetzten radioaktiven Stoffen sollten Gefahrenbereiche (kontaminierte Flächen) gemieden werden, bis die radiologische Lage charakterisiert ist und Sanierungsmaßnahmen die Kontaminationen so begrenzt haben, dass der Aufenthalt in den Bereichen wieder ermöglicht wird.

Schmutzige Bomben bestehen meist aus radioaktiven Nukliden, die im Bereich der Industrie oder Medizin verwendet werden. Täter können diese illegal entwenden, auch aus vagabundierenden Strahlenquellen können Radionuklide zum Bau einer RDD verwendet werden. In den meisten Fällen ist das exakte Radionuklid oder Radionuklidgemisch nach der Explosion nicht bekannt. Für den Fall, dass Gammastrahler verwendet werden, die relativ einfach nachweisbar sind, ist es ausreichend, von Cs-137 auszugehen, da Cs-137 eine plausible Dosisabschätzung in der frühen Phase des Notfalls liefert. Die größte Gefahr bei Alphastrahlern besteht durch ihre Inkorporation und kann zu erheblichen effektiven Dosen führen.

Bei einer Explosion eines aus wenigen Kilogramm bestehenden konventionellen Sprengsatzes kann das radioaktive Material bis zu einigen Kilometern in Windrichtung

verteilt werden, wobei es zu einer nicht unerheblichen Bodenkontamination kommen kann. Neben der Exposition durch die Freisetzung radioaktiven Materials, die abhängig von der beigesetzten Menge an Radionukliden ist, können Menschen durch die Druckwelle der Explosion in unmittelbarer Nähe schwerwiegende nicht-radiologische Gesundheitsschäden davontragen /EGG 05/.

In /MAG 07/ wurde die Inhalationsdosis in Abhängigkeit vom Abstand entlang der Ausbreitungsrichtung als Folge einer Explosion einer RDD mittels des Ausbreitungs- und Expositionsmodells LASAIR bestimmt (siehe Tab. 3.1). Dabei wurde eine Aktivität von $7,4\text{E}+13$ Bq Co-60 (dies entspricht der Aktivität gängiger Co-60 Quellen aus dem Bereich der Medizin und einer Masse von ca. 2 g) bei 2,5 kg konventionellem Sprengstoff angenommen. Die Windgeschwindigkeit betrug 5,4 m/s bei stabilen Wetterbedingungen. Infolgedessen würde ein Gefahrenbereich von vermutlich mehreren 100 bis 1000 m abgegrenzt werden, aus dem Menschen evakuiert werden und der weitere Zugang unterbunden wird.

Tab. 3.1 Mit LASAIR berechnete Inhalationsdosis entlang der Ausbreitungsrichtung in Abhängigkeit vom Abstand zum Detonationsort /MAG 07/

Dosis (mSv)	Abstand (km)
100	0,1
30	0,4
10	0,7
3	1,9
1	3,9
0,3	8,1

Nachdem erhöhte Messwerte in der Umwelt festgestellt worden sind, würden detaillierte Messprogramme gestartet werden, die ein genaues Bild über die Verteilung der Bodenkontamination liefern sollen. Daraufhin würde ein Dekontaminationskonzept erstellt und umgesetzt werden. Der Einsatz einer RDD würde kostspielige Aufräumarbeiten für die Dekontamination und Sanierung nach sich ziehen. Einige Bereiche würden aufgrund ihrer erhöhten Bodenkontamination für gewisse Zeit mit Zugangsverboten belegt werden, so lange Aufräumarbeiten andauern. Betroffene Personen würden Monate bis Jahre nach dem Ereignis weiterhin psychisch betreut werden müssen. Die Bewältigung der Situation ist Teil der nuklearspezifischen Gefahrenabwehr (NGA), für die in Deutschland die Bundesländer zuständig sind. Grundsätzlich arbeiten Strahlenschutzbehörden und

Behörden der allgemeinen Gefahrenabwehr (u. a. Polizei, Feuerwehr, Landesumweltbehörden) sowie Katastrophenschutzbehörden in solchen Fällen zusammen.

Einen umfassenden Leitfaden im Zuge der Notfallreaktion im Zusammenhang mit RDD bietet /NAT 17/.

Bedrohungsrelevante Parameter

Nuklidart, Gesamtinventar, Sprengsatzmenge, Explosionsort (Bevölkerungsdichte, geografische Gegebenheiten etc.)

3.1.2 Angriff oder Sabotageakt auf Transport mit radioaktiven Stoffen

Kurzbeschreibung

Bei diesem Ereignis werden Transportbehälter, die radioaktive Stoffe enthalten, mutwillig angegriffen bzw. beschädigt. Dies kann z. B. durch das Anbringen von konventionellem Sprengstoff geschehen. Der Angriff kann auf verschiedenen Transportwegen wie Straße, Schiene oder auf Schiffen erfolgen.

Transporte von radioaktivem Material und ihre Planungen werden in der Regel unter Verschluss gehalten, um mögliche Einwirkungen von außen zu verhindern. Generell ist ein solches Ereignis dennoch denkbar und möglich, vor allem wenn der Angriff bzw. der Sabotageakt von innen heraus initiiert wird, d. h. von Personen durchgeführt wird, die Kenntnis über den Transport haben bzw. selbst beim Transport eingebunden sind.

Radiologische Auswirkungen

Ein relevantes Szenario, bei dem große Mengen an radioaktivem Material transportiert werden, stellt der Transport von frischen oder abgebrannten Brennstäben aus Kernreaktoren z. B. in CASTOR-Behältern dar. Entscheidende Parameter zur Bewertung der radiologischen Auswirkung sind das Inventar des Behälters sowie seine Auslegung gegen Einwirkungen und der daraus resultierende Freisetzungsanteil. Untersuchungen /DRO 99/, /ALE 04/ zeigen, dass Brennelementbehälter enormen mechanischen und thermischen Belastungen standhalten.

Geht man von dem unwahrscheinlichen Worst-Case-Szenario aus, bei dem das Zehnfache der zulässigen maximalen Aktivität für Typ A Behälter für Kr-85, d. h. 100 TBq,

und die maximal zulässige Aktivität für alle anderen Nuklide innerhalb einer Woche aus einem Typ B Behälter freigesetzt werden, so führt dies zu einer effektiven Dosis von ca. 1 mSv, angenommen man stünde 24 Stunden in 15 m Entfernung von diesem Behälter. Dominierend ist dabei der Inhalationspfad /NAO 13/.

Die GRS hat auf dem Gebiet der Freisetzungen beim Transport von radioaktiven Stoffen Kompetenzen aufgebaut /GER 23/, /BEC 24/. Detaillierte Untersuchungen erfolgen dabei u. a. in Bezug auf Freisetzungsanteilen aus Transportbehältern bei Einwirkungen von außen.

Bedrohungsrelevante Parameter

Gesamtinventar (Brennstoff, radioaktive Abfälle, aktiviertes Material), Sicherungsbarrieren, Sprengstoffmenge, Sicherheitsmaßnahmen

3.2 Vorsätzliche Straftat, Störmaßnahme oder sonstige Einwirkung Dritter gegen oder auf eine kerntechnische Anlage

Kurzbeschreibung

Eine kerntechnische Anlage wird mutwillig angegriffen, so dass radioaktives Material freigesetzt wird oder freigesetzt werden kann. Dieses Ereignis ist dem Referenzszenario S10 des ANoPI-Bund zuzuordnen und wird als überregionaler Notfall eingestuft.

Für die Bewertung der radiologischen Auswirkungen und für eine entsprechende Notfallreaktion spielt die Art der Anlage und das mit ihr einhergehende Gefährdungspotential eine entscheidende Rolle. Ein relevanter Parameter ist die Menge des Inventars an radioaktivem Material. Sowohl die Auslegung der Anlage als auch der konkrete Ereignisablauf eines mutwilligen Angriffs haben Einfluss auf den Freisetzungsanteil. So können Freisetzungen durch beispielsweise einen Angriff von außen durch konventionelle Waffen, durch Sabotage von innen oder durch einen gezielten Flugzeugabsturz herbeigeführt werden. Die jeweiligen Freisetzungsmengen und -pfade sind stark abhängig von den einzelnen Szenarien.

3.2.1 Kernkraftwerke

Kernkraftwerke weisen aufgrund ihres größeren Inventars ein größeres Gefährdungspotential auf als Forschungsreaktoren. Das Anfangsinventar eines Druckwasserreaktors beträgt ungefähr $1\text{E}+20$ Bq, das eines Forschungsreaktors liegt – je nach Leistung – um mehrere Größenordnungen darunter. Kernkraftwerke sind nicht gegen jede Art von Waffen oder sonstiger möglicher zivilisatorischer Einwirkung von außen ausgelegt. Daher hat die Art der Waffe, mit der eine kerntechnische Anlage angegriffen und beschädigt wird, Einfluss darauf, ob und wieviel Aktivität freigesetzt wird. Ein Angriff mit einer Kernwaffe ist eher unwahrscheinlich, da eine gewollte Freisetzung auch mit konventionellen Waffen möglich wäre, gegen die Anlagen nicht mehr ausgelegt sind. Die Abschätzung des resultierenden Quellterms ist nicht trivial, möglich ist eine Superposition beider Quellterme, aus dem Inventar der Anlage und der Kernwaffe.

Radiologische Auswirkungen

Der Angriff auf ein Kernkraftwerk im Inland und Ausland wird anhand eines exemplarischen Szenarios in Kapitel 4.2 im Detail untersucht.

Die in den folgenden Abschnitten skizzierten Ereignisabläufe sollen eine exemplarische Auswahl möglicher Szenarien im Zusammenhang mit vorsätzlichen Straftaten, Störmaßnahmen und sonstigen Einwirkungen von außen auf anderweitige kerntechnischer Anlagen – neben denen auf Kernkraftwerken – skizzieren, welche zu einer Verletzung der Schutzziele führen können.

3.2.2 Forschungsreaktor

Als Forschungsreaktoren bezeichnet man Kernreaktoren, die nicht der Stromerzeugung, sondern unterschiedlichen Zwecken in Forschung oder Medizin dienen. Auch im Rahmen (universitärer) Ausbildung werden Forschungsreaktoren betrieben. Die Anlagen weisen teils erhebliche Variationen in ihrem Design (Schwimmbadreaktor, Tank-in-Pool Reaktor), in der Brennstoffzusammensetzung oder den Operationsmodi (Dauerbetrieb, gepulst) auf. Zumeist erfolgt eine Unterscheidung nach den Hauptanwendungsbereichen als Neutronenquelle zur Materialprüfung, zur Herstellung von Radionukliden für die Medizin, für Kritikalitäts- und Brennstoffexperimente oder für Ausbildungs- und Trainingszwecke. Die teils sehr lange Betriebsdauer von Forschungsreaktoren und ihre geforderte Flexibilität in ihren Anwendungsbereichen hält besondere Herausforderungen

bei der Aufrüstung von Sicherheitsausstattung /INT 16/ und dem Zusammenspiel von Komponenten bereit. Die meisten Forschungsreaktoren arbeiten im Leistungsbereich unter 100 MW_{th} (3.000 MW_{th} für typische Leistungsreaktoren) oder mit Nullleistung.

Deutschland betreibt neben fünf Nullleistungsreaktoren noch zwei Forschungsreaktoren: FRMZ (Mainz) und FRM II (Garching bei München). Der Forschungsreaktor BER II (Berlin) hat im Dezember 2019 seinen Betrieb eingestellt /INT 23/.

Vorkommnisse in Forschungsreaktoren haben aufgrund des erheblich geringeren Nuklidinventars (kleine Quellterme) im Vergleich zu Leistungsreaktoren und aufgrund der kleineren maximal möglichen Kerntemperaturen geringere Unfallauswirkungen. Auch die erzeugte Menge an radioaktiven Abfällen, die in Notfallsituationen involviert sein kann, ist erheblich geringer. Als relevant für potenzielle Unfallbetrachtungen gelten jedoch die in manchen Forschungsreaktoren verwendeten eigenen Arbeitsmodi, zu denen die Änderung der Kerngeometrie zu Experimentierzwecken, kürzere Arbeitszyklen zwischen Abschaltung und Experimenten oder direkte Eingriffe nahe des Reaktorkerns gezählt werden können.

Wie auch in Leistungsreaktoren lassen sich auslösende Ereignisse in Forschungsreaktoren in verschiedene Ereignisgruppen einteilen, deren Auftreten in verschiedenen Anlagenbetriebszuständen besonders wahrscheinlich bzw. erst möglich ist. Die Ereignisse können prinzipiell auf Unfälle, jedoch auch auf vorsätzliche Straftaten und Störmaßnahmen zurückzuführen sein. Bei letzteren sind jedoch zusätzliche Sicherheitsbrüche mit einzubeziehen, da zuerst ein Zugang zu den bzw. ein Zugriff auf die entsprechenden Komponenten gefunden werden muss.

Zu den Ereignissen gehören nach /MAY 19/:

- Transienten (Leistungsbetrieb, Notkühlbetrieb)
- Reaktivitätsstörungen (Leistungsbetrieb)
- Kühlmittelverluststörfälle (Leistungsbetrieb, Notkühlbetrieb, Stillstandsbetrieb, Bereitschaftsbetrieb), Kühlkanalblockaden
- Einwirkungen von innen (Leistungsbetrieb, Notkühlbetrieb)
- Einwirkungen von außen (Leistungsbetrieb, Notkühlbetrieb, Stillstandsbetrieb, Bereitschaftsbetrieb)

Radiologische Auswirkungen

In /PAP 14/ wurden für den griechischen Forschungsreaktor Democritos (5 MW pool type reactor, momentaner Status „extended shutdown“) Freisetzen für verschiedene Unfallszenarien abgeschätzt. Eine direkte Übertragung auf deutsche Anlagen ist zwar nicht ohne Weiteres möglich, erlaubt aber eine erste Abschätzung von zu erwartenden Freisetzen.

Tab. 3.2 Freisetzungssanteile für unterschiedliche Unfallszenarien nach /PAP 14/

FCB: Fuel channel blockage (Kühlkanalblockade), RIA: Reactivity insertion accident (Reaktivitätsstörung), LOCA: Loss of coolant accident (Kühlmittelverluststörfall)

Unfallszenario	Kernschaden (%)	Edelgase (%)	Iod (%)	Aerosole (%)
FCB	4	2	E-2	E-4
RIA	10	40	0,5	E-4
LOCA	10	100	100	100

Das BfS hat in enger Zusammenarbeit mit der GRS im Zuge der Szenarienentwicklung für die Notfallschutzplanung exemplarische Quellterme festgelegt /BFS 15/, so auch für einen deutschen Forschungsreaktor. Dabei wurde der Standort des Forschungsreaktors Berlin und als Quellterm mit höchster radiologischer Gefährdung BER-I (Freisetzung bei trockener Schmelze) ausgewählt. Die Freisetzen betragen demnach ungefähr

- $1\text{E}+16$ Bq für Edelgase,
- $1\text{E}+16$ Bq für Iod und
- $1\text{E}+12$ Bq für Aerosole.

Für Edelgase und Iod liegt die Aktivität zwei Größenordnungen, für Aerosole sogar fünf Größenordnungen unter dem größten anzunehmenden Quellterm bei Kernkraftwerksunfällen, dem FKA-Quellterm.

Zu den Rückhaltemechanismen in Forschungsreaktoren gehören Komponenten, die im Wesentlichen auch in Leistungsreaktoren eingesetzt werden /TUM 17/. Dazu zählen das Kühlmittel selbst, das wasserlösliche radioaktive Elemente wie etwa Jod zurückhalten kann. Edelgase werden aufgrund ihrer chemischen Inaktivität nicht von einer (Kühl-)Wasserrückhaltung beeinflusst und können im Ereignisfall an die Umgebung abgegeben werden. Das Containment hat neben der rein physischen Barriere zahlreiche

eingebaute Sicherheitssysteme, die im Ereignisfall Radioaktivität solcherart zurückhalten sollen, so dass kein Austritt in die Atmosphäre zu erwarten ist (Ausnahme: Edelgase). Dazu gehören etwa Belüftungssysteme mit unterschiedlichen Filterkomponenten (Kohle-, Glas-, HEPA-Filter).

Bedrohungsrelevante Parameter

Gesamtinventar (Brennstoff, radioaktive Abfälle, aktiviertes Material, Produkte wie Radionuklide für den medizinischen oder technischen Einsatz), thermische Leistung, Betriebsmodus, Sicherungsbarrieren, Sicherheitsmaßnahmen

3.2.3 Zwischenlager

Ein Zwischenlager ist ein temporärer Aufbewahrungsort für abgebrannte Brennelemente und/oder radioaktive Abfälle, wobei für erstere stets die hohe Nachzerfallswärme und die damit verbundene Notwendigkeit zur Kühlung zu berücksichtigen ist.

Für abgebrannte Brennelemente gibt es zwei Grundtypen von Lagern, die Nass- und Trockenlager. Im Nasslager befinden sich die Brennelemente in einem mit Wasser gefüllten Abklingbecken, das sowohl der Kühlung als auch der Abschirmung von ionisierender Strahlung dient. In Trockenlagern werden die Brennelemente in hermetisch dichten Behältern aufbewahrt (z. B. Transportbehälter vom CASTOR-Typ) und die Kühlung erfolgt durch passive Umluftzirkulation.

Deutschland verfügt über zwei zentrale Zwischenlager fern von Kernkraftwerksstandorten (Gorleben, Ahaus), sowie zwölf dezentrale Zwischenlager an Kernkraftwerken, Kernforschungszentren und kerntechnischen Anlagen /BAS 22/. Die Bundesländer haben darüber hinaus Landesammelstellen eingerichtet, die hauptsächlich (schwach- bis mittel) radioaktive Abfälle von Kleinerzeugern lagern.

Mit Ausnahme des Zwischenlagers in Neckarwestheim (Tunnellager) wurden die Standort-Zwischenlager nach zwei Bauweisen errichtet, die auf die STEAG GmbH (STEAG-Konzept) und die Wissenschaftlich-Technischen Ingenieurberatung GmbH (WTI-Konzept) zurückgehen. Beide Konzepte erfüllen die Schutzanforderungen nach dem Atomgesetz und sind auch gegen mögliche Terror- und Sabotageakte gesichert.

Den Transport- und Aufbewahrungsbehältern kommt dabei ein wesentlicher Teil der Schutzfunktion zu. Das Lagerungsgebäude schützt darüber hinaus vor schädlichen Einwirkungen auf die Behälter (witterungsbedingt, zivilisatorisch, terroristisch, etc.) und verhindert unbefugte Zutritte.

Der Großteil der Transport- und Lagerbehälter für hochradioaktive Abfälle gehört zum Typ CASTOR (Cask for storage and transport of radioactive material), deren Konstruktionsweise sie widerstandsfähig gegen äußere mechanische und thermische Einwirkungen macht und so die Schutzziele für Behälter sicherstellt. Dazu gehören der sichere Einschluss der radioaktiven Stoffe, die Abführung der Zerfallswärme, eine Sicherstellung der Unterkritikalität sowie die Abschirmung der emittierten Strahlung.

Zu den mechanischen und thermischen Belastungen, welche die Transport- bzw. Lagerbehälter im Rahmen der Zulassungsprüfung standhalten müssen, gehören /BFS 05/, /BAS 22/:

- Eintauchprüfung in Wasser über acht Stunden in 15 m Wassertiefe
- Eintauchprüfung in Wasser über eine Stunde in 200 m Wassertiefe
- Freier Fall aus 1 m Höhe auf einen Stahldorn von 15 cm Durchmesser
- Freier Fall aus 9 m Höhe auf ein unnachgiebiges Fundament
- Feuertest in einer allseitigen Flammenumgebung mit einer Temperatur von mindestens 800 °C für 30 Minuten

Zu Störfallszenarien, die Anlagenbetreiber im Sicherheitskonzept der Anlage zu berücksichtigen haben, gehören sowohl interne Fehlerabläufe wie Abstürze von Behältern, Herabstürzen von Lasten auf Behälter, Brände, andere Fehler bei der Handhabung, aber auch externe Einwirkungen wie Vorfälle im Zusammenhang mit Naturkatastrophen (Erdbeben, Hochwasser, Blitzschlag), Brände oder andere Störfälle in benachbarten Anlagen (terroristisch motiviert, als Sabotageakt oder Unfallszenario), Flugzeugabstürze oder Explosionsdruckwellen (terroristisch motiviert, als Sabotageakt oder Unfallszenario). Der Schutz gegen SEWD beinhaltet dabei jedoch nicht den Schutz gegen kriegs- und militärische Auseinandersetzungen.

Weitere Analysen zu Freisetzungsmechanismen und Ereignissen in Zwischenlagern finden sich im GRS-Bericht /GRS 22/.

Radiologische Auswirkungen

Ereignisabläufe vorsätzlicher Straftaten oder Störmaßnahmen können einzeln auf bestimmte Belastungen abzielen (z. B. vorsätzlich herbeigeführter Absturz eines Behälters). Diese Aspekte wurden jedoch im Rahmen der Zulassungsprüfung und des Genehmigungsverfahrens bereits abgedeckt, so dass ein Gefährdungspotential nicht ohne Weiteres ersichtlich ist bzw. im Rahmen des Schutzkonzepts behoben werden sollte.

Ereignisabläufe, die eine Kombination verschiedener Einwirkungen und sogar Terror- und Sabotageakte miteinbeziehen, können ohne tiefgreifende Analysen an dieser Stelle nur umrissen und grob abgeschätzt werden. Denkbar wären Fälle, bei denen die thermische Belastung für einzelne oder mehrere Behälter zu groß werden, so dass es zur teilweisen Zerstörung von Barrieren und damit zum Austritt von radioaktivem Material aus dem Behälter kommen könnte.

Bei angenommen 50 gelagerten Behältern an einem Zwischenlager und einem durchschnittlichen Inventar von $1\text{E}+17$ Bq pro Behälter befinden sich insgesamt $5\text{E}+18$ Bq am Standort. Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, sind Transportbehälter gegen Angriffe mit konventionellem Sprengstoff ausgelegt, detailliertere Untersuchungen bezüglich möglicher Freisetzungsanteile bedarf es jedoch für Angriffe mit größerer mechanischer bzw. thermischer Wirkung /LÖF 10/.

Bedrohungsrelevante Parameter

Gesamt- und Einzelinventar des Lagers und der Behälter, Integrität von Behältern und baulichen Barrieren, (interne und externe) Sicherheitslage

3.2.4 Landessammelstellen

In den Landessammelstellen werden Rohabfälle (flüssig, fest oder gasförmig), vorbehandelte Abfallprodukte, konditionierte Abfallprodukte und Endlagergebinde gelagert, die in Fässern (Fassungsvermögen 200 bis 400 l), Containern unterschiedlichen Typs sowie Guss- oder Betonbehältern verwahrt werden /BMU 21/.

Radiologische Auswirkungen

Die Lagerungsbehälter sind darauf ausgelegt, die Abfälle ihren spezifischen Eigenschaften nach (korrosiv, wärmeentwickelnd) sicher zu lagern, so dass Unfälle durch Lagerfehler kaum anzunehmen sind. Dennoch ist es möglich, dass aufgrund chemischer Reaktionen sowohl innerhalb des Abfallmaterials als auch zwischen den Abfällen und Umgebungsmaterialien Wechselwirkungen stattfinden können, z. B. Korrosionen in Abfallgebinden. Die Prozesse, die hier wirken, sind jedoch eher langsamer Natur und die Abfälle solcherart bearbeitet, dass kaum realistische Szenarien entworfen werden können, die einen schnellen Einsatz zur Bewertung einer zeitkritischen Notfalllage in Landessammelstellen notwendig machen würden.

Wie auch bei anderen kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen können vorsätzliche Straftaten und Störmaßnahmen nicht vollständig ausgeschlossen werden. Allerdings ist das Gefährdungspotential der bei den Landessammelstellen vorwiegend gelagerten schwachradioaktiven Abfällen im Verhältnis zu beispielsweise Zwischenlagern klein.

Bedrohungsrelevante Parameter

Gesamt- und Einzelinventar des Lagers und der Behälter, Integrität von Behältern und baulichen Barrieren, (interne und externe) Sicherheitslage

3.2.5 Urananreicherungsanlage

Im Folgenden wird beispielhaft die Urananreicherungsanlage Gronau (UAA Gronau) betrachtet. In der UAA Gronau wird mittels des Gaszentrifugenverfahrens Uranhexafluorid zur Verwendung als Kernbrennstoff in Kernkraftwerken angereichert. Ausgangsstoff ist das in Transportbehältern angelieferte Uranhexafluorid, ein kristalliner Feststoff, der giftig, radioaktiv, leicht flüchtig und korrosiv ist.

Für die verschiedenen Verfahrensschritte selbst, aber auch für Reinigungs- und Dekontaminationsverfahren (feste Abfälle, Abwässer) und die Lagerung von Hilfs- und Betriebsstoffen werden auf dem Betriebsgelände Endprodukte (engl.: product), Zwischenprodukte (etwa zur weiteren Anreicherung vorgesehene Verbindungen, engl.: feed) sowie nicht weiter verwertbare Stoffe (engl.: tails) gelagert.

Auf dem Gelände der UAA Gronau befinden sich nach Angaben des Betreibers /URE 19/:

- Feedlager: Freilager mit 8.200 m² und einer Lagerkapazität von 10.000 t Uranhexafluorid auf 825 Stellplätzen
- Lagerungsstätte von angereichertem Uran für 1.250 t Product (UF₆) mit einem maximalen Anreicherungsgrad von 6 %
- Tails-Lager: ein Freilager auf Betonplatten mit 21.300 m² Fläche für die Lagerung von bis zu 38.100 t UF₆
- Uranoxidlager mit einer Lagerkapazität von knapp 60.000 t Triuranoctozid (das erste Zwischenprodukt, das beim Abbau von Uranerzen gewonnen wird) U₃O₈, das in Stahlblechbehältern mit einer Wandstärke von 5 mm und einem maximalen Fassungsvermögen von 12 t aufbewahrt wird
- Pufferlager zur Aufbewahrung von Rohabfällen und Zwischenprodukten bis zur Konditionierung von Abfällen
- Abfalllager mit einer Gesamtfläche von rund 220 m² für maximal 40 Container: Nach § 7 AtG ist die Zwischenlagerung konditionierter radioaktiver Abfälle bis zu einem Volumen von 563,5 m³ und einer maximalen Gesamtaktivität von 3x10¹¹ Bq gestattet.

Nach Angaben des Betreibers URENCO /URE 19/ sind mögliche Störfälle mit (hauptsächlich chemischen) Belastungen der Umgebung

- die Freisetzung von Uranoxid
- die Freisetzung von Uranhexafluorid und damit zusammenhängend die Entstehung gesundheitsgefährdender, allerdings nicht radioaktiver Flusssäure (durch die Reaktion von Uranhexafluorid mit der Feuchtigkeit der Luft) und
- Freisetzung von Uranylfluorid.

Der An- und Abtransport zur bzw. von der UAA Gronau erfolgt per LKW über die Straße und als Schienenverkehr über das Gleisnetz der Deutschen Bahn. Das Uranhexafluorid wird dazu in Stahldruckbehältern transportiert. Die Behälter müssen der hohen Korrosivität des Uranhexafluorids standhalten und werden alle fünf Jahre auf Dichtigkeit geprüft. Den Vorgaben der IAEA nach halten die Behälter einem Brand mit Temperaturen von 800 °C für 30 Minuten stand. Rund 97 % des in der UAA Gronau angereicherten

Urans werden über die Straße zur Weiterverarbeitung ins Ausland verbracht. Ein weiterer Prozentsatz geht an die Brennelementfertigungsanlage Lingen zur Weiterverarbeitung (über Urandioxid) zu Brennelementen /GRS 22/.

Weitere Analysen zu Freisetzungsmechanismen und Ereignissen in Urananreicherungsanlagen finden sich im GRS-Bericht /GRS 22/.

Radiologische Auswirkungen

Die nach § 7 AtG genehmigungspflichtige Anlage UAA Gronau verfügt über Sicherheitsvorkehrungen, um den Schutz von Mensch und Umwelt zu gewährleisten. Vorsätzliche Straftaten und Störmaßnahmen können jedoch in keiner Anlage vollständig ausgeschlossen werden. Eine kombinierte Durchführung vorsätzlicher Straftaten auf dem Betriebsgelände bzw. auf Betriebskomponenten könnte dazu führen, dass die sicherheitstechnische Integrität von Lagerungsstätten verletzt wird, so dass es zu einem Austrag von radioaktivem Material in die Umgebung kommt. Die dadurch mögliche Freisetzungsmenge in die Umgebung (Quellterme) ist jedoch ohne weitere Annahmen, Szenarienabläufe und Sicherheitsanalysen an dieser Stelle nicht möglich. Des Weiteren ist hier zu bedenken, dass die chemische Toxizität der Stoffe eine radiologische Gefährdung unter Umständen überschreitet.

Bedrohungsrelevante Parameter

Gesamtinventar der Anlage sowie Teilinventare der Ausgangs- und verarbeiteten Stoffe mit evtl. zeitlich abhängigen Mengen auf dem Betriebsgelände, Integrität von baulichen Barrieren sowie Komponenten der An- und Auslieferung, chemische Toxizität

3.2.6 Entwendung von Kernbrennstoffen

Dieser Ereignisablauf beschreibt die einmalige oder wiederholte Entwendung von Kernbrennstoffen/radioaktivem Material in Mengen, mit denen

- a) die Herstellung einer kritischen Anordnung möglich ist (ohne Wiederaufarbeitung oder Anreicherung) oder
- b) eine Gefährdung von Leben und Gesundheit infolge erheblicher Direktstrahlung oder Freisetzung an einem anderen Ort möglich ist.

Ein Diebstahl von radioaktivem Material aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen kann prinzipiell sowohl von Außenstehenden als auch von Mitarbeitenden verübt werden, wobei davon auszugehen ist, dass letztere besser mit den Sicherheitsvorkehrungen und Zugangsbeschränkungen der Anlage vertraut sind und eventuelle Sicherheitslücken ausnutzen können /POP 15/.

So kam es in der Vergangenheit im US-amerikanischen Y-12 National Security Complex bei Oak Ridge zu mehreren Einbrüchen auf das Anlagengelände (zuletzt im Jahr 2012), die jedoch nicht terroristisch motiviert waren, sondern lediglich zu Protestzwecken durchgeführt wurden. Dies zeigte jedoch die unzureichende Bewachung des Geländes und, dass bestehende Sicherheitsvorkehrungen (Zäune, Sicherheitssensoren) mit verhältnismäßig einfachen Mitteln umgangen werden konnten. Radioaktives Material wurde jedoch nicht entwendet, und es bestand auch keine Gefahr für die Sicherheitsintegrität der Anlage. In deutschen Anlagen wurden in Anpassung an die weltweite Sicherheitslage, insbesondere nach den Terroranschlägen von 2001, Sicherungsvorkehrungen kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen stetig verbessert und ausgebaut, so dass ein unbefugtes Betreten von Anlagengeländen und Gebäudekomplexen weitgehend ausgeschlossen werden kann.

Im Jahr 2009 kam es in der US-amerikanischen Los Alamos Plutonium Facility (PF-4) zu einem versuchten Diebstahl von einer kleinen Menge mit Plutonium kontaminiertem Gold durch einen technischen Angestellten der Anlage. Der versuchte Diebstahl durch den langjährigen Mitarbeiter wurde jedoch frühzeitig entdeckt (in der ersten von insgesamt acht Sicherheitsstufen in PF-4), und das kontaminierte Material verließ nicht die Anlage, was die Verlässlichkeit der Sicherheitsvorkehrungen aufzeigte /POP 15/.

Radiologische Auswirkungen

Eine Insider-Bedrohung, die von Mitarbeitenden ausgeht, kann prinzipiell in keiner kerntechnischen Anlage völlig ausgeschlossen werden. Durch die Einhaltung von mehrschichtigen, komplexen Sicherungs- bzw. Sicherheitsvorkehrungen können Gefahren,

die durch einen Diebstahl von radioaktivem Material ausgehen, jedoch weitgehend ausgeschlossen werden. Welche Radionuklide von möglichen Diebstählen betroffen sein könnten, ist stets anlagenspezifisch und kann daher nicht allgemein angegeben werden.

Bedrohungsrelevante Parameter

Gesamtinventar (insbesondere Nuklidtyp, Menge, Aggregatzustand), Sicherungsbarrieren, Sicherheitsmaßnahmen, Personalpolitik der Einrichtung, allgemeine Sicherheitslage

3.3 Gefahrenlagen durch Nuklearwaffen

3.3.1 Notfall beim Umgang mit einer Nuklearwaffe

Kurzbeschreibung

Bei diesem Ereignisablauf kommt es zu einem Notfall beim Umgang mit einer Nuklearwaffe, ohne dass eine beabsichtigte nukleare Kettenreaktion (Detonation) herbeigeführt wird. Anders als bei Notfällen im Zusammenhang mit Kernkraftwerken (Referenzszenarien S1 bis S4), bei denen es je nach Art der Unfallszenarios mehrere Stunden dauern kann, bis es zu einer tatsächlichen Freisetzung kommt, können solche Ereignisabläufe und ihre Freisetzungen von radioaktivem Material instantan geschehen. Dieses Ereignis wird dem Referenzszenario S15 des ANoPI-Bund zugeordnet.

Ein solcher Notfall kann prinzipiell in drei mögliche Szenarien eingeteilt werden /FED 10/:

1. Das Trägersystem, auf dem die Kernwaffe transportiert wird, wird beschädigt, wodurch es zu einem Brand oder einer Explosion kommt. Die Kernwaffe bleibt intakt. Es kommt zu keiner Freisetzung von Radioaktivität.
2. Hoch explosive Stoffe in der Waffe detonieren, so dass radioaktives Material in die Umwelt gelangt.
3. Es kommt zu einer unbeabsichtigten Kettenreaktion (Kritikalitätsunfall). Dieses Ereignis ist aufgrund der Bauweise militärischer Kernwaffen unwahrscheinlich. Die Konsequenzen sind ähnlich einer beabsichtigten Detonation (siehe Kapitel 3.3.4).

Radiologische Auswirkungen

Der radiologisch relevantere und gleichzeitig wahrscheinlichere Ereignisablauf ist das Szenario Nummer 2. Relevante Radionuklide, die bei diesem Ereignis freigesetzt werden, sind die Spaltmaterialien Plutonium oder Uran sowie Tritium. Plutonium als Alphastrahler stellt eine große radiologische Gefahr durch mögliche Inkorporation dar. Die Gefahr durch Uran ist eher toxikologisch als radiologisch.

Der Quellterm hängt von der Menge des Inventars und der Nuklidzusammensetzung ab. Den größten Anteil am Quellterm hat das spaltbare, waffenfähige Pu-239. Der Anteil an Am-241 wird mit dem Alter der Waffe steigen. Für eine erste radiologische Bewertung kann die Gesamt-Alpha-Aktivität bestimmt werden. Im Ereignisfall eines großen Brandes oder einer Explosion von Brennstoff in der Kernwaffe wird ein Anteil des waffenfähigen Plutoniuminventars von 10^{-4} bis 10^{-2} freigesetzt. Lungengängige Partikel ($< 10\ \mu\text{m}$) werden einige bis einige zehn Kilometer in Windrichtung verteilt werden und zu Bodenkontaminationen im Bereich von $1\ \text{MBq/m}^2$ führen. Dabei können Ortsdosisleistungen von einigen $10\ \mu\text{Sv/h}$ erreicht werden /FED 10/.

Da es bei diesem Ereignisablauf zu keiner Kettenreaktion kommt, werden so gut wie keine Spalt- und Aktivierungsprodukte generiert. Damit ist die freigesetzte Gesamtaktivität deutlich kleiner als bei einer beabsichtigten Detonation einer Kernwaffe.

Bedrohungsrelevante Parameter

Gesamtinventar, Spaltmaterial (Nuklidtyp), Sicherungs- und Sicherheitsmaßnahmen

3.3.2 Selbstbau und Explosion einer technisch einfachen, nuklearen Sprengvorrichtung

Kurzbeschreibung

Improvisierte nukleare Sprengvorrichtungen (improvised nuclear device, IND) sind Waffen, die aus spaltbarem Kernwaffenmaterial hergestellt wurden und eine Nuklearexplosion verursachen. Eine IND könnte auch aus den Komponenten einer gestohlenen Waffe gebaut werden. Sie sind meist technisch einfach konstruiert, daher ist die Effizienz, also der Anteil an Spaltmaterial, der tatsächlich bei der Detonation umgesetzt wird, deutlich kleiner als bei einer militärisch genutzten Kernwaffe und damit auch die Sprengkraft.

Entscheidender Faktor bei dem Bau und Einsatz von IND ist der Zugang zu spaltbarem Material.

Radiologische Auswirkungen

Die Explosionskraft einer IND beruht auf der Kernspaltung spaltbaren Materials. Bei gleicher Masse gegenüber der RDD, wird eine weitaus größere Menge Energie freigesetzt. Als Folge würden in der unmittelbaren und weitreichenden Umgebung Infrastrukturen wie Gebäude oder Verkehrswege zerstört werden. Es werden tausende von Todesfällen erwartet. Bei Nuklearexplosionen werden eine große Anzahl an Menschen vor allem in der unmittelbaren Explosionsumgebung und in Richtung des Windes (Fallout-Zone) schwerwiegender radiologischer Exposition ausgesetzt sein, die bis zum Tod führen können. Nach einer Nuklearexplosion sollte Schutz in Gebäuden gesucht werden, die einen gewissen Abschirmeffekt gegenüber dem Aufenthalt im Freien aufweisen. Dieses Szenario wird dem Referenzszenario S14 zugeordnet und vorläufig als überregionaler Notfall eingestuft.

Sollte eine Detonation, also beabsichtigte Kettenreaktion, herbeigeführt werden, würden die Auswirkungen einer Kernwaffenexplosion mit geringer Sprengkraft ähneln (siehe Kapitel 3.3.4). Sollte es zu keiner Detonation kommen, würden die Auswirkungen vermutlich die einer RDD ähneln (siehe Kapitel 3.1.1).

Bedrohungsrelevante Parameter

Gesamtinventar (insbesondere Nuklidtyp und Menge), Sicherungsbarrieren in Zusammenhang mit dem Zugang zu spaltbarem Material, allgemeine Sicherheitslage

3.3.3 Einsatz gestohlener oder gekaufter Kernwaffen

Kurzbeschreibung

Gestohlene oder gekaufte Kernwaffen werden eingesetzt und zur Detonation gebracht. Dies kann z. B. durch terroristische Gruppen erfolgen, die sich auf illegale Weise Zugang zu Kernwaffen verschaffen haben.

Radiologische Auswirkungen

Die Auswirkungen sind mit dem Einsatz militärischer Kernwaffen gleichzusetzen (siehe Kapitel 3.3.4).

Bedrohungsrelevante Parameter

Gesamtinventar (insbesondere Nuklidtyp und Menge), Sicherungsbarrieren in Zusammenhang mit dem Zugang zu spaltbarem Material, allgemeine Sicherheitslage

3.3.4 Militärischer Einsatz von Nuklearwaffen

Kurzbeschreibung

Bei diesem Ereignis wird ein militärischer Nuklearsprengsatz, in dessen Besitz eine Atommacht ist, eingesetzt und zur Detonation gebracht. Dieses Ereignis wird dem Referenzszenario S14 des ANoPI-Bund zugeordnet (siehe hierzu auch Kapitel 2.4).

Radiologische Auswirkungen

Die Auswirkungen nach der Detonation einer Kernwaffe – sowohl mechanisch als auch radiologisch – hängen von vielen Parametern ab. Diese Parameter und daraus resultierende Auswirkungen können im Ereignisfall vermutlich nur grob abgeschätzt werden. Von welchen Parametern die Auswirkungen abhängen, wird im Folgenden skizziert.

- **Einsatzzweck und Sprengkraft**

Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, werden militärische Waffen in taktische und strategische Waffen unterteilt, wobei taktische Waffen kürzere Reichweiten und geringere Sprengkraft besitzen. Die Sprengkraft, meist angegeben in kT TNT-Äquivalent, stellt einen relevanten, wenn nicht den entscheidendsten Parameter für die Abschätzung von radiologischen und mechanischen Auswirkungen dar. Die Sprengkraft kann als Skalierungsfaktor für den Quellterm genutzt werden, d. h. eine 10-fache Sprengkraft wird in etwa die 10-fache Menge an Aktivität freisetzen. Auch der Radius des lokalen Fallouts um den Detonationsort vergrößert sich mit zunehmender Sprengkraft. Zudem vergrößert sich die Reichweite, in der aufgrund der starken Druckwelle keine Überlebenden zu erwarten sind. Die Sprengkraft hat damit auch unmittelbaren Einfluss auf die Notfallreaktion, die ein erhebliches Ausmaß annehmen würde.

- **Waffentechnik**

Kernwaffen werden in Fissionswaffen (A-Waffen) und Fusionswaffen (H-Waffen) eingeteilt, wobei letztere meist in hybrider Form existieren (siehe Kapitel 2.4.2). Die Waffentechnik hat Einfluss auf die freigesetzte Aktivität und die Zusammensetzung des Nuklidvektors. H-Waffen haben bei gleicher Sprengkraft einen geringeren Anteil an spaltbarem Material und damit einen kleineren Quellterm zur Folge. Als Worst-Case-Szenario kann im Zuge der Notfallreaktion daher von einer Fissionswaffe ausgegangen werden.

- **Einsatzart**

Kernwaffen können in unterschiedlichen Höhen zur Detonation gebracht werden (siehe Kapitel 2.4.1). Während Detonationen direkt am Boden oder in Bodennähe viel Erdmaterial aufwirbeln, was zu einem lokalen Fallout mit Aktivierungsprodukten aus dem Schutt führt, spielt bei Detonationen in Höhe ohne Kontakt zum Boden ein lokaler Fallout eine untergeordnete Rolle (siehe Abb. 2.3).

- **Detonationsort**

Die Detonation einer Kernwaffe in einem zivilisatorisch dichter besiedelten Gebiet hat im Hinblick auf die gesundheitlichen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Folgen größeren Einfluss als eine Detonation in Gebieten, in denen es so gut wie keine Zivilisation gibt. Dies bezieht sich vor allem auf die Erstfolgen der Direktstrahlung und des lokalen Fallouts in der Nähe der Detonation als auch auf die Druckwelle sowie des – je nach Explosionshöhe – entstehenden elektromagnetischen Impulses, der Elektrotechnik und viele weitere kritische Infrastrukturen zerstören kann.

Bedrohungsrelevante Parameter

Gesamtinventar (insbesondere Nuklidtyp, Menge), Sprengkraft, Effizienz, Waffentechnik, Einsatzart, Detonationsort, allgemeine Sicherheitslage

3.3.5 Abfangen einer Nuklearwaffe in der Luft

Kurzbeschreibung

Nukleare Sprengsätze werden in der Luft abgefangen, d. h. beispielsweise mit Hilfe eines Raketenabwehrsystems abgeschossen.

Radiologische Auswirkungen

Der nukleare Sprengsatz zerschellt in Bruchstücke, ähnlich wie beim Notfall beim Umgang mit einer Kernwaffe, bei dem zwar keine Kettenreaktion in Gang gesetzt wird, jedoch aufgrund der Explosion des umliegenden Sprengsatzes Radioaktivität in die Umgebung verteilt wird. Da der Abschuss in Höhen von vermutlich mehreren zehn Kilometern stattfindet, ähnelt die Verteilung von radioaktivem Material eher der eines Satellitenabsturzes. Dabei wird erwartet, dass größere Bruchstücke als bei einer Detonation nach Kettenreaktion entstehen, die vermutlich auf mehrere hundert Quadratkilometer verteilt werden. Es wird teilweise lokale „Hotspots“ mit Bereichen größerer Aktivität geben. Die verteilte Gesamtaktivität wird in der Größenordnung des Waffeninventars liegen, wobei vermutlich ein geringer Teil aus Aktivierungsprodukten aus der Ummantelung der Kernwaffe besteht.

Bedrohungsrelevante Parameter

Gesamtinventar (insbesondere Nuklidtyp und Menge), Waffentechnik, Ort des Abfangens, allgemeine Sicherheitslage

4 Ausbau der Wissensbasis und ergänzende Analysen

In Kapitel 3 wurden mögliche Ereignisabläufe und Freisetzungsmechanismen im Zusammenhang mit nuklearen Gefahrenlagen zusammengestellt. Aufbauend auf den Ergebnissen aus Kapitel 3 werden in diesem Kapitel für die Ereignisabläufe einer Kernwaffenexplosion (siehe Kapitel 4.1) sowie eines Angriffs auf eine kerntechnische Anlage (siehe Kapitel 4.2) ergänzende Analysen bezüglich der radiologischen Auswirkung und die zu ihrer Bewertung notwendigen relevanten Parameter durchgeführt. In Bezug auf den Angriff auf eine kerntechnische Anlage wird dabei insbesondere untersucht, inwiefern sich diese Abläufe auf bereits untersuchte Unfallabläufe der Referenzszenarien S1 bis S5 überführen lassen. Weitergehender Analysebedarf, der durch dieses Vorhaben nicht gedeckt werden kann, wird ausgewiesen.

4.1 Radiologische Gefahrenlagen durch den Einsatz von Kernwaffen

In Kapitel 2.4 wurden die grundlegenden physikalischen Eigenschaften und Merkmale einer Kernwaffenexplosion beschrieben. Im folgenden Kapitel werden ergänzende Analysen zur Abschätzung relevanter radiologischer Größen durchgeführt, um zum einen die radiologischen Folgen im Zusammenhang mit der Detonation von Kernwaffen abschätzen und zum anderen mögliche Notfallreaktionsmaßnahmen ableiten zu können. Eine umfassende Grundlage, auf die die detaillierteren Analysen zum Großteil erfolgen, stellt /GLA 77/ dar. Weitere Referenzen werden an entsprechender Stelle ausgewiesen.

4.1.1 Quelltermabschätzungen

Ein entscheidender Parameter zur Abschätzung des Quellterms für den Fallout nach der Detonation einer Kernwaffe ist ihre Sprengkraft. Die freigesetzte Aktivität skaliert dabei primär mit der Sprengkraft der Waffe. Dies gilt sowohl für die Gesamtaktivität als auch für jedes Einzelnuklid. Daher ist die Sprengkraft ein entscheidender Skalierungsfaktor zur Abschätzung vieler Größen wie Schadensradien und Dosisleistung.

Bei einer Kernwaffenexplosion werden mehrere hundert verschiedene Radionuklide freigesetzt, der Großteil besteht aus den Spaltprodukten von U-235 oder Pu-239. Weiterhin entstehen durch die freigesetzten Neutronen Aktivierungsprodukte, beispielsweise aus der Ummantelung der Waffe, aktivierte Bestandteile der Luft sowie aus Bodenmaterial und Schutt bei bodennahen Explosionen. Je nach Effizienz der Waffe wird ein gewisser

Anteil des Spaltmaterials nicht umgesetzt und ist ebenso Bestandteil des Nuklidvektors. Einen geringen Teil machen durch die freigesetzten Neutronen generierte Transurane aus.

Den mit Abstand größten Anteil an der Gesamtaktivität bilden die Spaltprodukte. Aktivierungsprodukte (inkl. Transurane) können, je nach Waffenmaterial, im Zeitraum zwischen ca. 20 Stunden und zwei Wochen nach Detonation bis zu 40 % an der Gesamtaktivität ausmachen. Zu anderen Zeitpunkten ist ihre Aktivität im Vergleich zu der der Spaltprodukte vernachlässigbar /GLA 77/. Der damit verbundene Fehler beeinträchtigt die Genauigkeit der im Rahmen dieser Untersuchung vorgenommenen Abschätzung nicht wesentlich. Die Effizienz militärischer Fissionswaffen beträgt ca. 25 %, d. h. 75 % des Spaltmaterials würde nicht umgesetzt werden. Allerdings ist die Aktivität des übrigen Spaltmaterials gegenüber der der Spaltfragmente nur sehr gering. Nicht umgesetztes Spaltmaterial kann daher im Rahmen dieser Untersuchungen vernachlässigt werden.

Ein erster Ansatz zur Bestimmung der relativen Nuklidzusammensetzung ist ein Vergleich mit den generierten Spaltprodukten in einem Kernreaktor. Dort wird U-235 zur Spaltung gebracht, die radioaktiven Spaltprodukte selbst zerfallen wiederum zu weiteren Spaltprodukten. Auch werden einige Transurane durch den Beschuss von U-238 mit Neutronen generiert. Aufgrund des kontinuierlichen Beschusses von Uran mit Neutronen stellt sich nach einer gewissen Zeit ein Quasi-Gleichgewicht an Nukliden im Reaktorkern ein. Die Anzahl aller Atome eines bestimmten Nuklids an der Gesamtanzahl aller Atome der Spaltprodukte ist der sog. „cumulative fission yield“, wobei „fission yield“ auch als Spaltausbeute bezeichnet wird. Bei einer Nuklearwaffenexplosion allerdings entstehen die Spaltprodukte auf einer sehr viel kleineren Zeitskala und unter einer sehr viel größeren Energiedichte, so dass der Vergleich nur als grobe Abschätzung herangezogen werden kann.

Es existieren eine Reihe von Datenbanken und Bibliotheken zu Kernstruktur- und Zerfallsdaten für alle bekannte Nuklide, die aus experimentellen Daten gewonnen und mit theoretischen Modellen ergänzt wurden. Eine dieser Bibliotheken ist das Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF) des National Nuclear Data Center /NAT 22/.

In Abb. 4.1 ist die kumulative Spaltausbeute von U-235 und Pu-239 für schnelle Neutronen gegen die Massenzahl der Spaltprodukte aufgetragen. Die Spaltausbeute bei U-235 zeigt eine leichte Tendenz zu Nukliden mit kleinerer Massenzahl. Für die in Tab. 4.1 angegebenen Radionuklide ergeben sich im Vergleich zwischen Uran und Plutonium im

Mittel Abweichungen von weniger als ca. 1 % bezüglich der Spaltausbeute. Dies gilt insbesondere auch für die radiologisch relevanten Radionuklide Sr-89, I-131 und Cs-137. Dies lässt als erste grobe Abschätzung die Schlussfolgerung zu, dass die relative Zusammensetzung des Nuklidvektors für eine Kernwaffe aus U-235 in guter Näherung dieselbe ist wie für Pu-239 und es im Sinne der Bewertung der radiologischen Auswirkungen ausreicht, eine uranbasierte Fissionswaffe in Betracht zu ziehen.

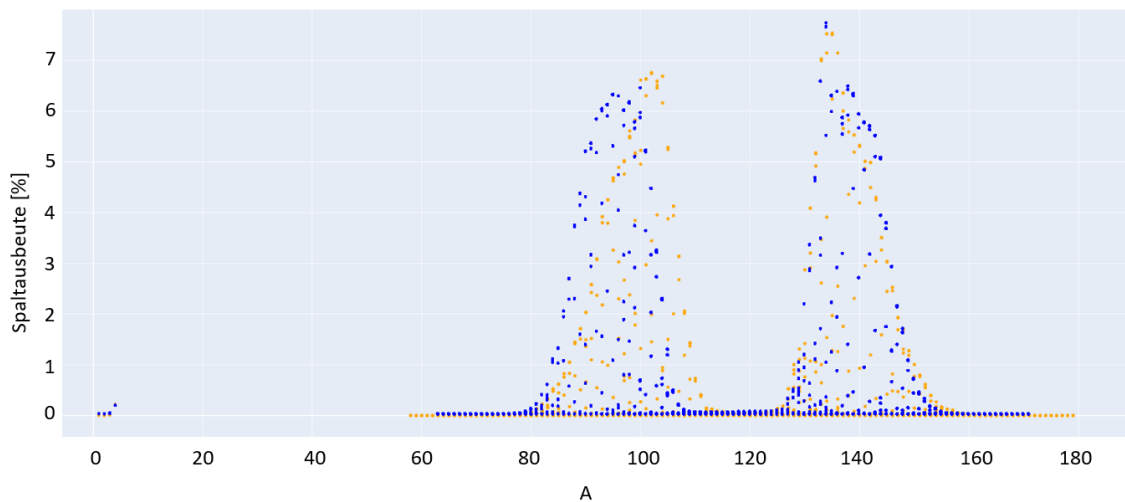


Abb. 4.1 Kumulative Spaltausbeute von U-235 (blau) und Pu-239 (gelb) für schnelle Neutronen (0,5 MeV) /IAEA 21b/

Für die Vorhersage der Zusammensetzung des Fallouts nach einer Kernwaffenexplosion existieren Analysetools (siehe auch Kapitel 5). Der Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code (ORIGEN) /OAK 22/ simuliert den Beschuss von Spaltmaterial mit Neutronen und den Zerfall von Spaltprodukten, Aktivierungsprodukten sowie Aktiniden über einen festgelegten Zeitraum. Das ORIGEN Fallout-Analyse-Tool bietet eine Software-schnittstelle für die Durchführung einer detaillierten Analyse des von ORIGEN erzeugten radiologischen Fallout-Quellterms. In der Literatur finden sich einige mit den o. g. Analysetools modellierte Quellterme bzw. modellierte relative Zusammensetzungen relevanter Nuklide /BUD 18/, /MOL 14/, /KRA 13/.

Die Abb. 4.2 zeigt, dass die generierten Spaltprodukte für U-235 und Pu-239 vergleichbar sind /MOL 14/. U-235 tendiert zu Spaltprodukten mit etwas geringerer Masse. Bei der in einer Kernwaffe ablaufenden Kettenreaktion werden Neutronen mit einer Energie von jeweils ca. 5 MeV generiert (siehe Kapitel 2.4.1), daher sind die Spaltprodukteverteilungen für schnelle Neutronen zu betrachten (rote und lila Kurve in Abb. 4.2).

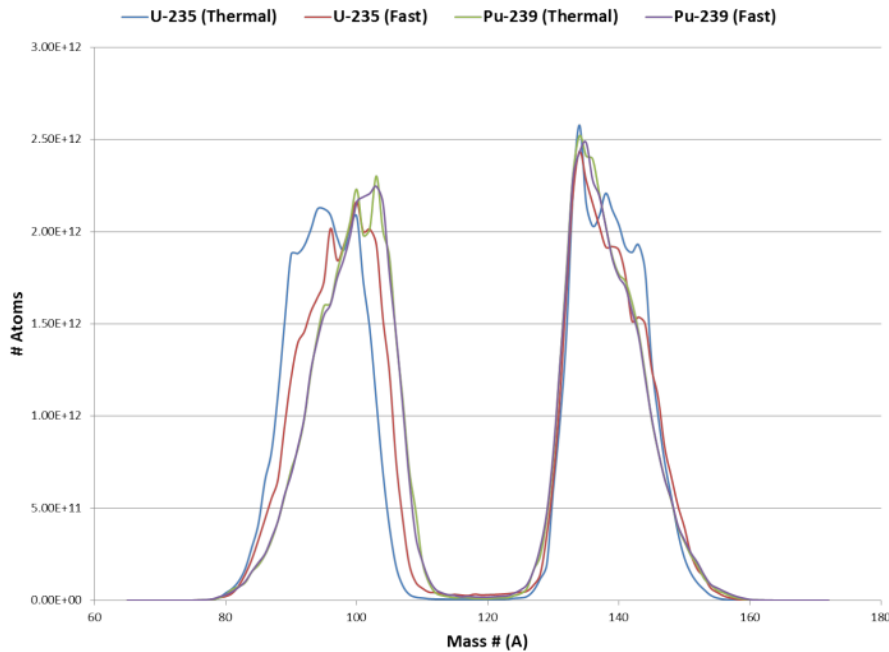


Abb. 4.2 Spaltproduktkurve nach Berechnungen des Fallout Analysis Tool /MOL 14/

Die bei der Recherche in diesem Vorhaben eruierte umfangreichste Zusammenstellung eines Quellterms für Fissionswaffen findet sich in /KRA 13/. Der Livermore Weapons Activation Code (LWAC) verwendet dabei das Spaltproduktinventar von ORIGEN unter Berücksichtigung von Waffen- und Umgebungscharakteristiken. Die Auswahl der entstehenden Nuklide wurde auf eine überschaubare Anzahl reduziert, indem beispielsweise alle Nuklide mit einer Halbwertszeit von weniger als 2,5 Minuten in ihre Nachkommen umgewandelt werden.

Die Annahme ist insofern gerechtfertigt, da die Radionuklide mit Halbwertszeiten von weniger als einigen Minuten während der Entwicklung und thermischen Stabilisierung der Wolke und nach anschließendem atmosphärischen Transport im Wesentlichen vollständig in ihre Nachkommen zerfallen sein werden. Diese kurzlebigen Radionuklide würden in den für die Notfallreaktion bedeutenden Zeiträumen von einigen Stunden nach Detonation bis hin zu mehreren Wochen und Monaten eine untergeordnete Rolle spielen.

Aus den Berechnungen ergibt sich eine zeitunabhängige nuklidspezifische Aktivität von 44 Radionukliden (siehe Tab. 4.1), die zusammen mehr als 92 % der effektiven Gesamtdosis über alle Expositionspfade des gesamten Fallout-Inventars (d. h. Spalt- und Aktivierungsprodukte) ausmachen, die in 10 km Entfernung windabwärts erhalten werden

würden /KRA 13/. Die Nuklidliste enthält eine ausreichende Anzahl von Radionukliden, um hinreichend genaue radiologische Bewertungen zu ermöglichen.

Tab. 4.1 Quellterm von Fallout-Radionukliden (Spalt- und Aktivierungsprodukte) bei uranbasierten Kernwaffen /KRA 13/

Radionuklid	Aktivität kurz nach Detonation [Bq/kT]
Ba-140	5,37E+16
Ba-141	5,31E+19
Ba-142	8,48E+19
Ce-141	7,11E+11
Ce-143	4,60E+14
Ce-144	2,10E+15
Co-58	4,54E+14
Co-58m	8,43E+16
Cs-137	2,38E+12
Cs-138	2,60E+18
I-131	6,81E+13
I-133	5,24E+16
I-134	2,27E+18
I-135	2,62E+18
La-141	7,53E+15
La-142	8,53E+16
Mn-54	8,45E+13
Mn-56	7,65E+18
Mo-99	1,94E+14
Mo-101	5,83E+19
Ru-103	9,96E+15
Ru-106	2,09E+14
Sb-128	5,37E+15
Sb-129	6,85E+16
Sb-130	3,49E+18
Sb-131	2,10E+19
Sn-128	1,44E+18
Sr-89	5,90E+12
Sr-90	4,11E+11
Sr-91	1,63E+18
Sr-92	5,88E+18
Tc-104	2,04E+19
Te-131	5,32E+17
Te-131m	2,23E+16
Te-132	3,96E+16
Te-133	5,53E+19
Te-133m	6,38E+18

Radionuklid	Aktivität kurz nach Detonation [Bq/kT]
Te-134	2,57E+19
Y-92	6,97E+15
Y-93	2,61E+16
Y-94	5,37E+19
Y-95	9,76E+19
Zr-95	4,80E+13
Zr-97	9,81E+17

In /BUD 18/ werden zehn Radionuklide und deren relativer Anteil an der Gesamtaktivität nach 100 Tagen, einem Jahr und zehn Jahren aufgelistet. Die Daten basieren ebenso auf dem o. g. LWAC. Die Tab. 4.2 zeigt, dass in den früheren Phasen nach der Detonation die Aktivität durch die Nuklide Y-91, Zr-95 und Ru-103 dominiert werden. In der späten Phase, zehn Jahre nach Detonation, machen Sr-90 und Cs-137 zusammen knapp 80 % der Aktivität aus.

Tab. 4.2 Anteil der primären Fallout-Aktivität ausgewählter Radionuklide zu drei verschiedenen Zeitpunkten /BUD 18/

Radionuklid	Halbwertszeit	Rel. Anteil der Aktivität nach 100 Tagen [%]	Rel. Anteil der Aktivität nach 1 Jahr [%]	Rel. Anteil der Aktivität nach 10 Jahren [%]
Sr-89	50 Tage	11	3	-
Sr-90	29 Jahre	0,2	3	36
Y-91	59 Tage	22	7	-
Zr-96	66 Tage	19	2	-
Ru-2103	40 Tage	19	2	-
Ru-106	369 Tage	3	24	0,5
Cs-137	30 Jahre	0,3	3	46
Ce-141	33 Tage	14	0,7	-
Ce-144	284 Tage	8	34	0,2
Pm-147	2,6 Jahre	1,4	13	14

Neben dem Nuklidinventar ist auch die Partikelgrößenverteilung in der Wolke entscheidend für die Ausbreitung und die radiologischen Auswirkungen. Die Wolke kann nach /ROL 14/ in sechs Schichten eingeteilt werden (siehe Abb. 4.3). Der obere Teil (Pilzkopf) trägt dabei knapp 80 % der Gesamtaktivität in der Wolke.

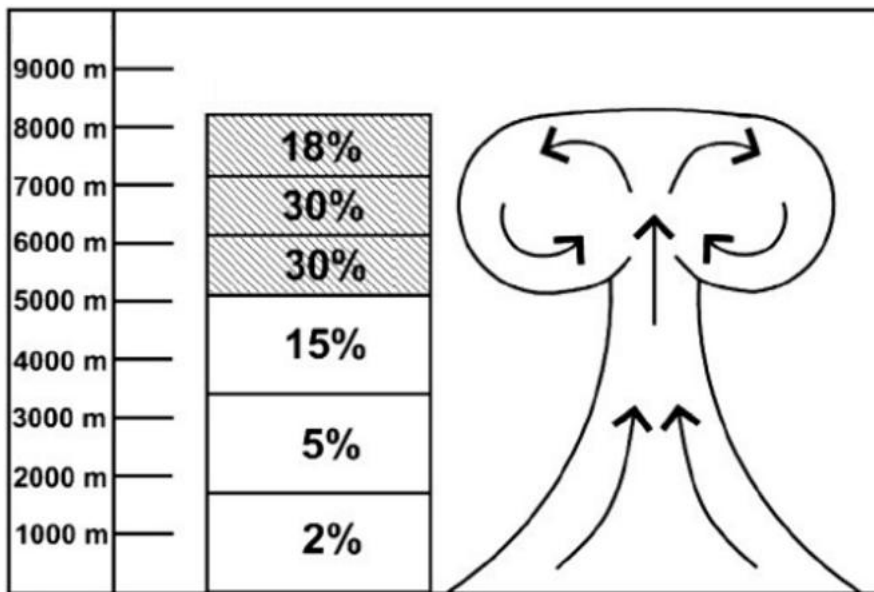


Abb. 4.3 Modelldarstellung eines Atompilzes und der Gesamtaktivitätsanteil in jedem definierten Vertikalsegment für eine Explosion von 10 kT /ROL 14/

Mit Hilfe des Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)-Modells, ein Lagrange'sches Partikel-Modell zur Modellierung von Stofftransporten unter Verwendung meteorologischer Felder, wurden in /ROL 14/ Partikelgrößenverteilungen innerhalb dieser sechs Schichten berechnet. Die Partikel wurden dabei in 13 Größenkategorien unterteilt (siehe Tab. 4.3).

Tab. 4.3 Partikelgrößenverteilung und prozentualer Anteil der Aktivität nach Partikelgröße (logarithmisch-mittlerer Partikeldurchmesser (µm) (Spalten) und Wolkenhöhe (m) (Zeilen) für die Partikelverteilung aus /GLA 77/, nach /ROL 14/

Durchmesser/ Wolkenhöhe	500	350	275	225	187,5	162,5	137,5	112,5	87,5	70	57,5	45	20	Summe (%)
8200	0,175	0,525	0,525	0,875	0,7	1,05	1,4	2,1	3,15	1,75	1,75	1,4	2,1	17,5
7166	0,3	0,9	0,9	1,5	1,2	1,8	2,4	3,6	5,4	3	3	2,4	3,6	30
6130	0,3	0,9	0,9	1,5	1,2	1,8	2,4	3,6	5,4	3	3	2,4	3,6	30
5100	0,15	0,45	0,45	0,75	0,6	0,9	1,2	1,8	2,7	1,5	1,5	1,2	1,8	15
3400	0,05	0,15	0,15	0,25	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	0,5	0,5	0,4	0,6	5
1700	0,25	0,075	0,075	0,125	0,1	0,15	0,2	0,3	0,45	0,25	0,25	0,2	0,3	2,5
Summe (%)	1	3	3	5	4	6	8	12	18	10	10	8	12	100

Aus den Informationen zur Nuklidzusammensetzung, Partikelgrößenverteilung und Wolkengeometrie lässt sich eine Quellgeometrie definieren, mit der weitere Ausbreitungsrechnungen und Dosisberechnungen durchgeführt werden können. Nach aktuellem Kenntnisstand sind für das Szenario einer Nuklearwaffenexplosion 37 der 44 Radionuklide aus dem Nuklidvektor nach /KRA 13/ im Entscheidungshilfesystem RODOS des BfS hinterlegt. Ausbreitungsrechnungen sind nicht Bestandteil dieses Vorhabens.

Quelltermskalierung für Fusionswaffen

Die vorangegangenen Analysen und Betrachtungen beziehen sich auf eine U-235 basierte Fissionswaffe. Wie bereits ausgeführt, kann die Nuklidzusammensetzung auch für eine Pu-239 basierte Fissionswaffe näherungsweise herangezogen werden. Bei geboosteten Fissionswaffen ist der Anteil an Fusionsenergie sehr klein (ca. 1 %). 1 g Tritium spalten zusätzliche 450 g Plutonium, was einer zusätzlichen Sprengkraft von 9 kT entspricht. Bei taktischen Waffen mit einer Sprengkraft von einer Größenordnung von 10 kT wird durch das Boosten die Sprengkraft ungefähr verdoppelt (bei gleicher Menge an Spaltmaterial). Das Boosten ist daher am wirkungsvollsten für kleine, leichte Fissionswaffen (taktische Waffen), die ansonsten einen geringen Wirkungsgrad hätten. Eine geboostete Fissionswaffe mit einer Sprengkraft von 10 kT hat demnach ungefähr halb so viel Spaltmaterial wie eine Fissionswaffe von 10 kT Sprengkraft ohne Boosten. /SUB 98/

In einer typischen Konfiguration einer thermonuklearen Waffe tragen Kernspaltung und Kernfusion jeweils etwa zur Hälfte zum Gesamtenergieertrag bei. Daher wird ungefähr die Hälfte des o. g. Inventars aus Spalt- und Aktivierungsprodukten einer reinen Fissionswaffe erwartet. Die Kernfusion bei thermonuklearen Waffen, also die zweite Stufe, erzeugt im Vergleich zur Kernspaltung viel weniger und kurzlebigere Radionuklide, nämlich nur Tritium. Tritium ist reaktionsfreudig und wird vermutlich zu einem Großteil zu He-4 umgesetzt. Übrig bleiben nach der Reaktion daher Helium, nicht umgesetztes Deuterium und viele Neutronen (vgl. Kapitel 2.4.2.4).

4.1.2 Analysen zur Abschätzung relevanter Parameter zur Erfassung der radiologischen Lage

Der technische Bericht /NATO 14/ befasst sich mit dem Umgang von CBRN Ereignissen auf Land, in der Luft und auf See. Das Kapitel 6 in /NATO 14/ befasst sich dabei mit der Warnung und Vorhersagen von nuklearen Gefahrenlagen. Die Notfallreaktion militärischer Streitkräfte beinhaltet neben der Alarmierung, dass eine Detonation erfolgt ist, Methoden zur Abschätzung der Sprengkraft einer Kernwaffe sowie Prognosen zu betroffenen und gefährdeten Gebieten.

Relevante Methodiken werden in diesem Kapitel systematisch aufbereitet. Sie dienen dazu, in einem nuklearen Notfall einfache Abschätzungen im Hinblick auf die radiologische Gefährdung durchführen und schnelle Entscheidungen bezüglich der notwendigen oder möglichen Notfallreaktion treffen zu können.

Die in diesem Kapitel eruierten Zusammenhänge zwischen gewissen Größen bzw. Parametern werden in einem in diesem Vorhaben erarbeiteten Prototypen eines Analysetools zur Abschätzung von radiologischen und nicht-radiologischen Auswirkungen bei Kernwaffenexplosionen integriert. An dieser Stelle sei jedoch zu erwähnen, dass solche Zusammenhänge auf Beobachtungen und Empirie beruhen und teilweise mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Das Tool erhebt keinen Anspruch auf exakte Berechnungen, sondern dient als erste grobe Abschätzung radiologischer und nicht-radiologischer Auswirkungen bei Kernwaffeneinsätzen.

4.1.2.1 Sprengkraft und Wolkenabmessung

Die relevante Größe im Zusammenhang mit Kernwaffen ist ihre Sprengkraft. Sie ist Eingangsparameter für die Ermittlung weiterer wesentlicher Größen, insbesondere der verteilten Aktivität. /NATO 14/ beschreibt Methoden, mit Hilfe derer die Sprengkraft einer Kernwaffe auf Basis von Informationen über Wolkenabmessungen abgeschätzt werden kann.

Die Größen, die von einem Beobachter ermittelt werden können, sind

- der Abstand zwischen dem Detonationsort (ground zero) und dem Beobachter,
- die Zeit zwischen Blitzlicht und Knall (flash to bang time) zur Abschätzung des Abstands, falls dieser unbekannt ist, und

- die Ausdehnung der radioaktiven Wolke, wie Wolkenboden (cloud bottom), Wolkenoberseite (cloud top), Wolkenbreite (cloud width).

Das Prinzip der Abschätzung der Sprengkraft beruht u. a. auf der Nutzung von Nomogrammen, d. h. Diagrammen, an denen Werte einer mathematischen Funktion näherungsweise abgelesen werden können (siehe Abb. 4.4). Dafür zeichnet man eine Verbindungslinie zwischen mindestens zwei bekannten/ermitteltem Werten auf der jeweiligen Skala und bestimmt den Schnittpunkt und damit den Wert auf der Achse der unbekannten Größe, in diesem Fall der Sprengkraft. Die mathematischen Zusammenhänge beruhen dabei auf Empirie. Mit Hilfe solcher Nomogramme lässt sich schnell ein Zusammenhang zwischen Größen ermitteln. Allerdings sind bestimmte Größen wie die Wolkenbreite, ausgedrückt in Winkeln vom Beobachtungspunkt, nicht immer einfach zu bestimmen. Außerdem muss die Pilzwolke nach der Detonation erst ihre Maximalgröße erreicht haben, um solche Berechnungen bzw. Abschätzungen anhand von Nomogrammen vornehmen zu können. Dies kann je nach Größe der Sprengkraft einige zehn Minuten dauern. Solche Abschätzungen sind einfach durchzuführen, wenn wesentliche Parameter bekannt sind, allerdings sind diese auch mit großen Unsicherheiten behaftet.

Die oben dargestellten Parameter zur Abschätzung der Sprengkraft werden mit großer Wahrscheinlichkeit nicht im selben Augenblick der Detonation durch den Menschen selbst beobachtet werden können. Solche Analysen könnten gegebenenfalls nach der Detonation mit zur Verfügung stehenden Videomaterialien durchgeführt werden.

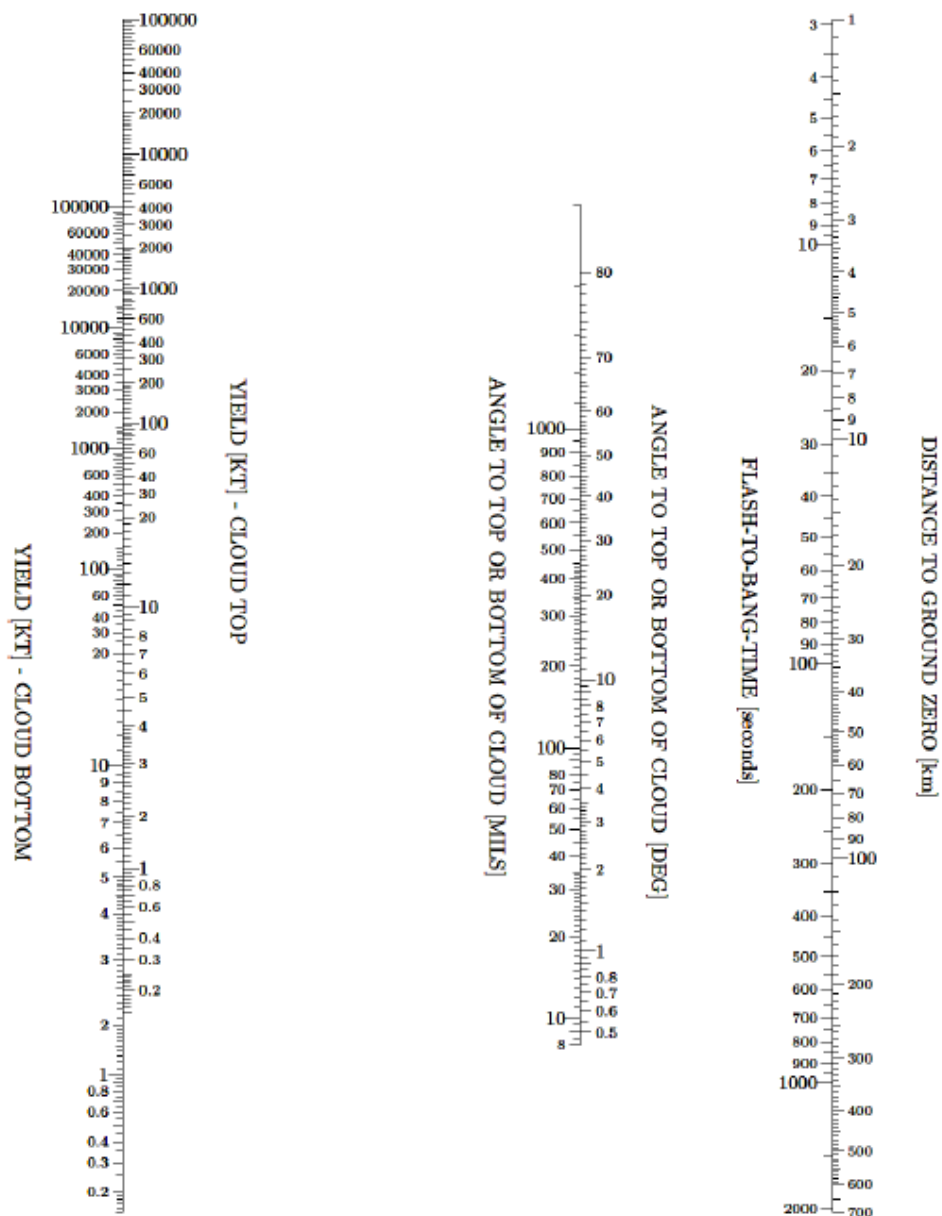


Abb. 4.4 Abschätzung der Sprengkraft (kT) bei bekanntem Winkel zur Ober- oder Unterkante der Wolke und flash-to-bang-time bzw. Entfernung von Ground Zero

Eine flash-to-bang-time von 60 Sekunden und eine Winkelbreite von 275 mils ($\sim 15^\circ$) entsprechen einer Sprengkraft von 50 kT.

Ebenso wird in /NATO 14/ der Zusammenhang zwischen der Sprengkraft y und den Wolkenparametern anhand eines semilogarithmischen Graphen dargestellt (siehe Abb. 4.5). Daraus lässt sich die Sprengkraft bei bekannter Wolkenabmessung direkt ablesen.

„2/3 stem“ entspricht dem Stamm unterhalb der Pilzwolke, der in grober Näherung für relativ kleine Sprengkräfte 2/3 der Höhe von Boden bis zum cloud bottom einnimmt (vgl. Abb. 4.3). Für größer werdende Sprengkraft nimmt dieser Wert ab. Die schwarze gestrichelte Linie in Abb. 4.5 entspricht ungefähr der Flughöhe eines Passagierflugzeugs.

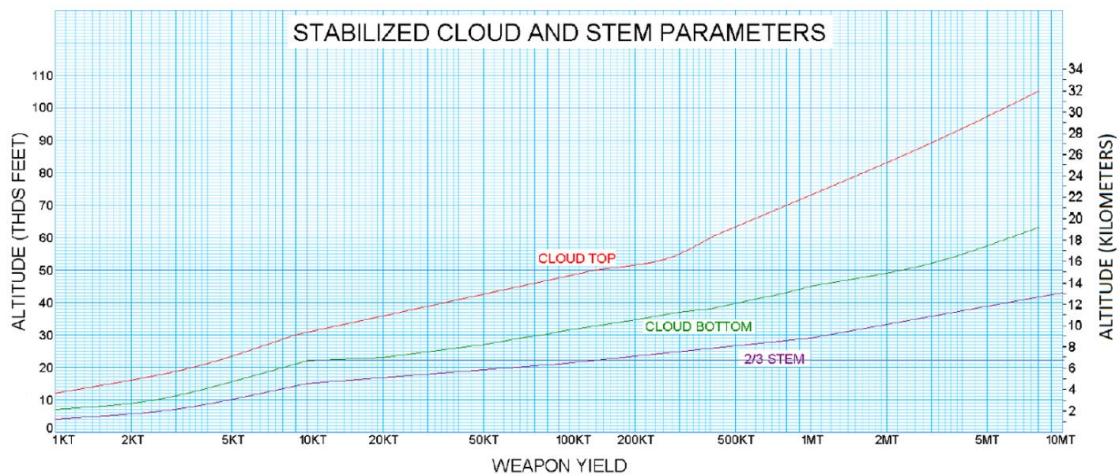


Abb. 4.5 Höhe verschiedener Wolkenparameter im stabilisierten Zustand in Abhängigkeit der Sprengkraft /NATO 14/

Auch in /GLA 77/ wird der Zusammenhang zwischen Sprengkraft und Wolkenabmessungen (hier Höhe und Radius der Wolke) graphisch dargestellt (siehe Abb. 4.6). Auffällig ist, dass für Sprengkräfte bis ungefähr 1 MT der Zusammenhang zwischen yield und Radius stark sublinear ist. Mit steigender yield nähert sich dieser Zusammenhang einem linearen Verhältnis an. Die Größe des Wolkenradius bestimmt, in welchem Umkreis um den Detonationsort lokaler Fallout zu erwarten ist.

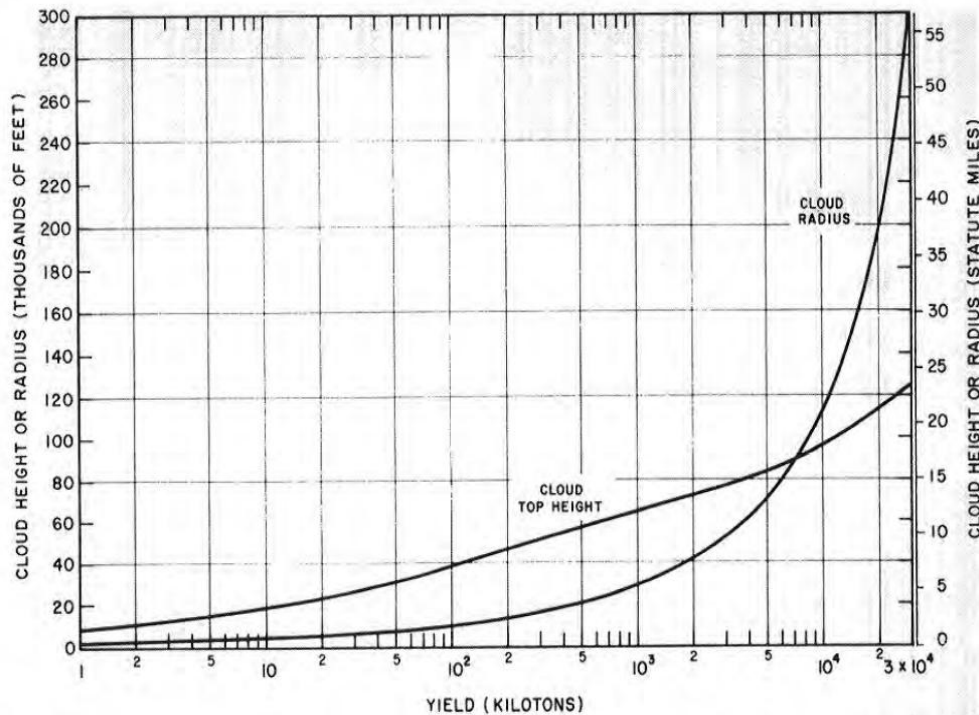


Abb. 4.6 Zusammenhang zwischen Sprengkraft (yield) und Wolkenhöhe/Radius (cloud height/radius) /GLA 77/

4.1.2.2 Wolkendurchzug

Ein Großteil der Partikel in einer radioaktiven Wolke kann über weite Strecken getragen werden. Einsatzkräfte, die Menschenleben retten wollen oder zu einem späteren Zeitpunkt radiologische Messungen durchführen, sollten diesen Aufgaben daher nicht nachgehen, bevor die radioaktive Wolke über das betroffene Gebiet hinweggezogen ist.

Die Zeit nach einer Detonation t_{end} , bis die radioaktive Wolke vollständig über einen Ort hinweggezogen ist, kann über zwei Terme abgeschätzt werden. Zum einen braucht der Fallout der Partikel ungefähr das 1,25-fache der Zeit t_a , bis die Wolke an dem zu betrachtenden Ort angekommen ist, zum anderen braucht die Wolke eine gewisse Zeit, um über den Ort hinwegzuziehen.

Diese Zeit hängt vom Durchmesser d der Wolke und der effektiven Windgeschwindigkeit v ab:

$$t_{\text{end}} = 1,25 t_a + d/v,$$

wobei $t_a = s/v$ und s dem Abstand vom zu betrachtenden Ort und dem Detonationsort entspricht.

4.1.2.3 Dosis aus Direktstrahlung

Die initiale Strahlung aus der Nuklearwaffenexplosion, die Direktstrahlung, tritt in der ersten Minute nach der Explosion auf, d. h. sie hält nur so lange an, wie die Kernspaltung (oder -fusion) stattfindet. Sie besteht hauptsächlich aus Gamma- und Neutronenstrahlung. Je größer die Sprengkraft einer Nuklearwaffe, desto größer ist der Energieanteil, der auf thermische Strahlung und die Druckwelle zurückzuführen ist. Das bedeutet, dass bei großen Sprengkräften die zu verzeichnenden Todesfälle in der unmittelbaren Umgebung des Detonationsortes eher auf Verletzungen aus Druckwelle und thermischer Strahlung zurückzuführen sind.

In /GLA 77/, das bereits 1977 veröffentlicht wurde, werden vereinfachte Methoden, u. a. Strahlungstransport-Modelle, beschrieben, die zur Vorhersage des Dosisbeitrags aus der Direktstrahlung entwickelt worden sind. In /GLA 77/ sind die Ergebnisse anhand von Graphen dargestellt, aus denen der Dosisbeitrag aus der Direktstrahlung in Abhängigkeit von der Sprengkraft und vom Abstand zum Detonationsort abgeleitet werden kann.

In Tab. 4.4 werden auf Grundlage der Angaben in /GLA 77/ der Abstand zum Detonationsort für eine gegebene Energiedosis aus initialer Neutronenstrahlung D_n sowie die Energiedosis durch die aus dem Spaltungsprozess hervorgerufene Gammastrahlung D_γ für mehrere Sprengkräfte einer Fissionswaffe aufgelistet. Die Energiedosis D_n bzw. D_γ beschreibt dabei die durch die Neutronen bzw. Gammastrahlung abgegebene Energie pro Masse ($1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$) und H_n bzw. H_γ die Äquivalentdosis (in Sv), in die für die Neutronenstrahlung ein Wichtungsfaktor von $w_n = 10$ für Neutronen mit einer Energie zwischen ca. 1 MeV und 50 MeV (Neutronen aus dem Spaltungsprozess weisen eine Energie von ca. 10 MeV auf) miteinberechnet ist. Der Wichtungsfaktor w_γ für Gammastrahlung beträgt 1.

Die Angaben beziehen sich dabei auf eine Kernwaffenexplosion in Höhe ohne Bodenkontakt. Für Kernwaffenexplosionen mit Bodenkontakt wird die angegebene Dosis mit einem Faktor 0,5 multipliziert. Dies impliziert die teilweise Absorption der Direktstrahlung durch den Boden.

Für den Fall, dass thermonukleare Waffen (Fusionswaffen) eingesetzt werden, kann der Abstand zum Detonationsort für alle Dosiswerte mit dem Faktor 1,2 multipliziert werden, d. h. die gleiche Dosisexposition aus initialer Neutronenstrahlung wird bei thermonuklearen Waffen in größerer Entfernung erreicht. Bezüglich der initialen Gammastrahlung aus den Spaltungsprozessen wäre es genau umgekehrt. Hier muss die Dosis, die in einem festen Abstand zum Detonationsort bei Fissionswaffen erreicht wird, mit demjenigen Faktor multipliziert werden, der dem Bruchteil der Gesamtausbeute aus der Spaltung entspricht, z. B. 0,5 für eine Waffe mit 50 % Spaltausbeute.

Tab. 4.4 Isodosis-Abstände vom Detonationsort für verschiedene Sprengkräfte
/GLA 77/

	Leichte Strahlen- krankheit (Erbrechen, Übelkeit)	Schwere Strahlen- krankheit (Infektionen, Blutungen)	Letale Dosis
Neutronen- strahlung	$D_n = 10 \text{ rad}$	$D_n = 100 \text{ rad}$	$D_n = 300 \text{ rad}$
	$H_n = 1 \text{ Sv}$	$H_n = 10 \text{ Sv}$	$H_n = 30 \text{ Sv}$
1 kT	1200 m	900 m	750 m
10 kT	1500 m	1200 m	1100 m
100 kT	2000 m	1500 m	1400 m
Gamma- strahlung	$D_\gamma = 100 \text{ rad}$	$D_\gamma = 1000 \text{ rad}$	$D_\gamma = 3000 \text{ rad}$
	$H_\gamma = 1 \text{ Sv}$	$H_\gamma = 10 \text{ Sv}$	$H_\gamma = 30 \text{ Sv}$
1 kT	900 m	550 m	250 m
10 kT	1400 m	900 m	700 m
100 kT	1800 m	1400 m	1100 m

In Tab. 4.5 ist die Gesamtenergiedosis (Summe aus Neutronen- und Gammastrahlung aus den Spaltprodukten) in Abhängigkeit von gegebenen Abständen abgeschätzt. Die Dosis skaliert in guter Näherung mit der Sprengkraft der Waffe, d. h. die Energiedosis ergibt sich durch Multiplikation dieser Werte mit der Sprengkraft der Waffe in kT. Man beachte den starken exponentiellen Abfall der Dosis mit dem Abstand. Bei einer Sprengkraft von 1 kT ist innerhalb von 1 km Abstand mit fatalen Folgen bzw. schweren Strahlenerkrankungen zu rechnen.

Tab. 4.5 Gesamtenergiedosis aus der Direktstrahlung in verschiedenen Abständen zum Detonationsort für eine Nuklearwaffenexplosion pro kT

Abgeleitet aus den Angaben in Tab. 4.4.

Abstand	0,5 km	1 km	2 km	4 km
Energiedosis	35 Gy	1 Gy	12 mGy	3 µGy

4.1.2.4 Gesamtaktivität aus dem Fallout

Die Gesamtaktivität des Fallouts kurz nach der Detonation wird ebenso weitestgehend durch die Sprengkraft der Waffe bestimmt. Obwohl bekannt ist, dass jedes Radionuklid unter den Spaltprodukten eine bestimmte Halbwertszeit hat, ist das nach einer Kernwaffenexplosion entstehende Gemisch des Fallouts so komplex, dass es nicht möglich ist, den Zerfall als Ganzes in Form einer Halbwertszeit darzustellen. Dennoch wurde festgestellt, dass sich die zeitabhängige Gesamtaktivität $A(t)$ der Spaltprodukte mit Hilfe einer recht einfachen Gleichung annähernd berechnen lässt.

$$A(t) = A_1 t^{-1.2},$$

wobei A_1 die Aktivität des Fallouts eine Stunde nach Detonation darstellt. Die Gleichung gilt für das Zeitintervall zwischen einer Stunde und 200 Tagen nach Detonation. Die eine Stunde nach Detonation berücksichtigt dabei den Umstand, dass Radionuklide mit kurzer Halbwertszeit nicht berücksichtigt werden. Die Zerfalls- bzw. Aktivitätsrate des Fallouts ist in Abb. 4.7 dargestellt.

Daraus lässt sich die „7-Stunden-Regel“ ableiten:

Die Aktivität aus dem Fallout eine Stunde nach der Detonation wird mit 100 % angenommen. Ungefähr sieben Stunden nach der Detonation ist die Aktivität der Spaltprodukte auf 1/10 der ursprünglichen Aktivität (eine Stunde nach der Detonation) gesunken, nach 7x7 Stunden = 49 Stunden auf ca. 1/100. Das heißt, nach ca. zwei Tagen beträgt die Aktivität nur noch ca. 1 % der Anfangsaktivität des Fallouts. Dieser Zusammenhang lässt sich auch auf die Dosisleistung, die aus der Aktivität des Fallouts resultiert, übertragen.

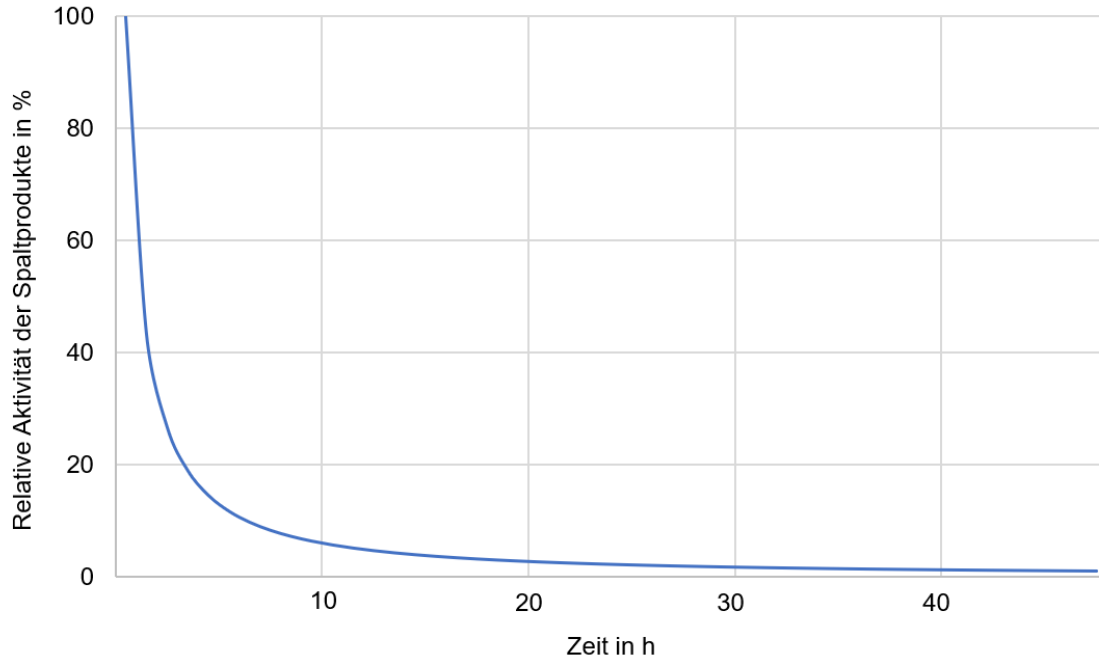


Abb. 4.7 Zerfalls- bzw. Aktivitätsrate des Fallouts (Spaltprodukte) nach einer Detonation

Aktivität wird eine Stunde nach der Detonation als 100 % angenommen.

4.1.2.5 Dosis aus dem Fallout

Die zeitliche Abhängigkeit der Aktivität des Fallouts lässt sich auch auf die Dosisleistung $\dot{D}(t)$, die aus der Aktivität des Fallouts resultiert, übertragen:

$$\dot{D}(t) = \dot{D}_1 t^{-1.2},$$

wobei $\dot{D}_1$ der Dosisleistung eine Stunde nach der Detonation entspricht, aus der durch Integration über die Zeit die aus dem Fallout resultierende Gesamtenergiedosis D (ohne jegliche Schutzmechanismen und Abschirmeffekte) bestimmt werden kann:

$$D = \int_{t_i}^{t_f} \dot{D}(t) dt = \int_{t_i}^{t_f} \dot{D}_1 t^{-1.2} dt = 5 \dot{D}_1 (t_i^{-0.2} - t_f^{-0.2}),$$

$t_f - t_i$ entspricht dabei dem Expositionszeitraum. Die Dosisleistung nach dem Fallout wird bestimmt durch die Gammasubmersion und Bodenstrahlung der Partikel, die bereits im Nahbereich sedimentiert sind. Die unbekannte Größe ist die Dosisleistung zum Zeitpunkt t_1 ($t = 1$ h) nach Detonation, die zu diesem Zeitpunkt nicht ad-hoc gemessen werden

kann, da zum einen der Fallout, also das Ablagern radioaktiver Partikel auf den Boden, noch nicht abgeschlossen ist und die Dosisleistung noch so hoch ist, dass Einsatzkräfte und Messtrupps diese Zonen noch nicht betreten können. Über eine Messung der Dosisleistung zum Zeitpunkt t_2 kann jedoch die „Referenzdosisleistung“ zum Zeitpunkt t_1 ermittelt über die sog. Kaufmann-Gleichung ermittelt werden:

$$\dot{D}_1 t_1^{-1.2} = \dot{D}_2 t_2^{-1.2}$$

$\dot{D}_1$ stellt die Dosisleistung zum Zeitpunkt t_1 und $\dot{D}_2$ die Dosisleistung zum Zeitpunkt t_2 am selben Ort dar. Die Messungen können an verschiedenen Orten durchgeführt werden, um die räumliche Verteilung des Fallouts zu bestimmen. Auch können Dosisleistungsmessungen aus der Luft mit der Bodendosisleistung korreliert werden. Dazu muss einmalig die Dosisleistung am Boden und in der Luft über demselben Punkt am Boden gemessen werden. Das Verhältnis der Leistungen am Boden zu Luft stellt einen Korrelationsfaktor dar, der für die Abschätzung der Bodendosisleistung mit Messungen aus der Luft genutzt werden kann. Dies verringert die Exposition von Einsatzkräften vor Ort. Ist die Referenzleistung $\dot{D}_1$ bestimmt, kann die Gesamtenergiedosis durch den Fallout D für einen bestimmten Expositionszeitraum $t_f - t_i$ bestimmt werden.

Entscheidend für den Dosisbeitrag aus dem Fallout sind die ersten Stunden nach der Detonation. Die Dosis aus dem Fallout bei einer Expositionszeit von einer Stunde entspricht ungefähr 1/10 der akkumulierten Gesamtdosis, die eine Person in ihrem gesamten Leben erhalten würde (hier wird nur die externe Strahlung berücksichtigt). Der Anteil der Dosis, die sich aus der Exposition durch den Fallout in den ersten 24 bis 48 Stunden nach Detonation ergibt, entspricht bereits ungefähr der Hälfte der gesamten akkumulierten Dosis. Daraus lassen sich Schutzstrategien und -maßnahmen für Personen in der Umgebung der Detonation hinsichtlich des Verbleibens in Gebäuden oder möglicher Evakuierungen ableiten (siehe Kapitel 4.1.3). In Abb. 4.8 ist der Prozentsatz der zeitintegrierten Dosis, die durch externe Exposition hervorgerufen wird, für verschiedene Expositionszeiten dargestellt (ohne Abschirmeffekte). Daraus lässt sich ablesen, dass innerhalb des ersten Tages nach Detonation bei einer theoretisch vermeidbaren Exposition (vollständige Abschirmung) für die ersten zehn Stunden (gestrichelte Linie) nur ca. ein Drittel der Dosis erreicht wird wie für eine „vollständige Exposition“ unmittelbar nach der Detonation (durchgezogene Linie).

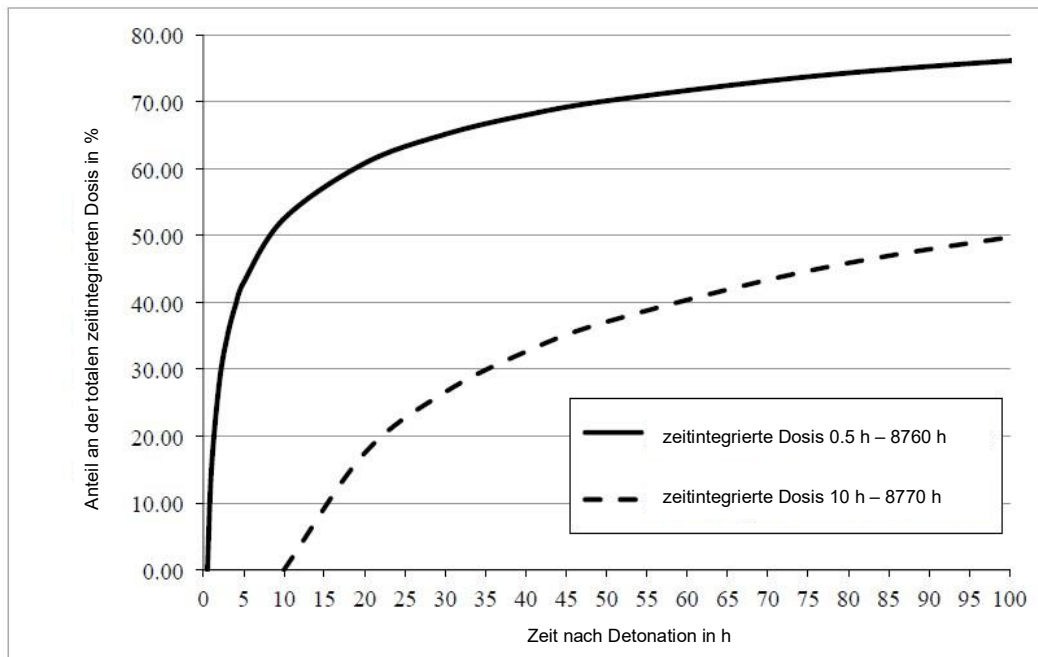


Abb. 4.8 Anteil an der zeitintegrierten durch externe Strahlung des Fallouts induzierten Dosis für verschiedene Expositionszeiten /KRA 13/

Eine gleichmäßige Verteilung der radioaktiven Partikel über den Untergrund ist unwahrscheinlich. In der Praxis würde ein größerer Anteil der Spaltprodukte in der Nähe des Detonationsortes abgelagert werden als in größerer Entfernung. Daher wird die Dosisleistung in der Nähe des Detonationsortes deutlich über dem Durchschnitt liegen, während sie an weiter entfernten Orten in der Regel geringer sein wird. Berechnungen ergeben, dass, wenn die Fallout-Partikel gleichmäßig über eine glatte, unendliche, ebene Fläche verteilt würden, wobei die Aktivität in jeder Quadratmeile derjenigen aller Spaltprodukte aus einer Kernwaffenexplosion von 1 kT entspräche, die Dosisleistung in einer Höhe von einem Meter über dem Boden eine Stunde nach der Explosion ungefähr 30 Gy/h betragen würde /GLA 77/.

4.1.3 Notfallreaktion und Schutzmaßnahmen

Nukleare Explosionen weisen neben den radiologischen Konsequenzen für Mensch und Umwelt auch Unterschiede hinsichtlich ihrer mechanischen Auswirkungen auf. Im Gegensatz zu chemischen Explosionen trägt eine nukleare Explosion eine gravierende, langanhaltende Druckwelle und daraus resultierende überdimensionale Winde mit sich. Dadurch kann – je nach Sprengkraft – das nukleare Ereignis mehr als nur lokale Auswirkungen haben.

Zonenansatz

Für ein geeignetes Notfallmanagement kann das umliegende Gebiet in Zonen aufgeteilt werden. Die Größen der Zonen sind dabei nicht festgesetzt, sondern können je nach Sprengkraft und Ausmaß der Explosion variabel sein. Die Zonen zeigen eher das qualitative Ausmaß der Kernwaffenexplosion auf, als dass sie durch festgelegte Dosiswerte definiert sind. Ziel dieses Zonenansatzes besteht darin, eine erste grobe Abschätzung und Einteilung der Schadensgebiete vorzunehmen, um geeignete Notfallmaßnahmen anzuwenden. Es sollen Menschenleben gerettet werden, dort wo es noch möglich ist, gleichzeitig sollen die Risiken für die Gesundheit von Einsatzkräften abgewendet werden. Der Zonenansatz und seine phänomenologische Ausprägung werden u. a. in /GLA 77/, /FEMA 10/, /DHS 16/ und /FEMA 21/ dargestellt.

Die folgende qualitative Charakterisierung der Schadenszonen beschreibt ein Szenario einer 10 kT Kernwaffenexplosion mit Bodenkontakt in einer urbanen Umgebung. Quantitative Angaben sind Näherungen und hängen im Einzelnen von unterschiedlichen Faktoren ab.

- **Leichte Schadenszone (engl.: Light Damage, kurz: LD-Zone)**
Sie ist gekennzeichnet durch leichte Gebäudeschäden wie zersprungene Fensterscheiben und durch leicht zu behandelnde Verletzungen (aufgrund umherfliegender Splitter) von Menschen, die sich weiter entfernt von der Detonation aufgehalten haben. Leichte Verletzungen wie Trommelfellrupturen werden bei einem Überdruck von ca. 0,3 bar in einer Entfernung von ca. 5 km vom Detonationsort erwartet, die mit großer Wahrscheinlichkeit nicht lebensbedrohlich sind. Falls sich Verletzte selbstständig bewegen können, sollten Einsatzkräfte diese zu den nächsten Versorgungsstellen führen und in die Zonen vordringen, in denen die Rettung von Opfern am dringlichsten ist. Die LD-Zone wird wahrscheinlich Aufräumarbeiten auf den Straßen erforderlich machen, z. B. das Beseitigen von Schutt, Glas, Stromkabeln und zerstörten Fahrzeugen. In der LD-Zone wird eine eher geringe Exposition erwartet, außer die DF-Zone (siehe weiter unten) befindet sich genau innerhalb der LD-Zone.
- **Mittlere Schadenszone (engl.: Medium Damage, kurz: MD-Zone)**
Es treten bei kleineren, leichten Gebäuden erhebliche Schäden auf, teilweise kommt es aufgrund des entflammbareren Materials auch innerhalb von Gebäuden zu Bränden. Je nach Windstärke können die Winde die Flammen in die LD-Zone weitertragen. Dort können die Brände jedoch leichter beherrscht werden. Die MD-Zone ist

gekennzeichnet durch Trümmer, herabgerissene Versorgungsleitungen und Strommasten und umgestürzte Verkehrsmittel.

Menschen erleiden aufgrund des hohen Druckes der Explosion und der umherfliegenden Trümmerteile erhebliche Verletzungen. Auch herrscht die Gefahr von Verbrennungen der Haut und Augen aufgrund der thermischen Strahlung. Hohe Gebäude oder andere Objekte können Menschen vor thermischer Strahlung schützen.

Die Opfer können mit medizinischer Versorgung gerettet werden, während sie ohne jegliche Hilfe nicht überlebensfähig sind. Ein Hauptanliegen der Einsatzkräfte wird die Brandbekämpfung innerhalb der MD-Zone sein. Dafür muss ausreichend Löschwasser zur Verfügung stehen.

Auf lokaler Ebene sollten die zuständigen Behörden und Organisationen Pläne für die Gefahrenabwehr in der MD-Zone entwickeln, die u. a. Folgendes umfassen sollten:

- Festlegung von Notfallmaßnahmen zur Maximierung der Rettungseinsätze für überlebensfähige Verletzte,
- Maßnahmen zur Minimierung des Gesamtrisikos für Einsatzkräfte,
- Bereitstellung von Versorgungsmaterialien an den Orten, an denen wahrscheinlich große Bevölkerungsgruppen leben, einschließlich Notunterkünften oder U-Bahnen sowie
- Bereitstellung von Einsatzkräften aus sämtlichen Sachgebieten wie Strahlenschutz, chemische Gefahrenstoffe und medizinische Versorgung.

Aufgrund eines schwerwiegenden Ereignisses wie einer Kernwaffenexplosion, das nicht nur lokale Auswirkungen mit sich bringt und auch aufgrund der politischen Bedeutung ein Zusammenwirken aller zuständigen Behörden auch auf Bundes- und Landesebene verlangt, werden Notfallmaßnahmen über alle Sachbereiche hinweg notwendig sein.

- Schwere Schadenszone (engl.: Severe Damage, kurz: SD-Zone)

Sie ist charakterisiert durch vollständig zerstörte Infrastruktur. Durch den hohen Druck der Explosionswelle sind Lungenrupturen nicht selten. Auch können der Einschuss und Aufprall loser Trümmerteile auf den Körper bereits fatale Folgen haben. Direktstrahlung ist weitestgehend in der SD-Zone von Bedeutung, da die Intensität mit größerem Abstand zum Ground Zero (GZ) immer weiter abnimmt. Allerdings stellen Verletzungen aus der enormen Druckwelle die größere Gefahr bzgl. der

Überlebenschance dar.

In der SD-Zone sind weniger Brände durch thermische Strahlung zu erwarten, da dort große Winde toben und entzündbares Material oft unter Schutt vergraben ist. Die Überlebenswahrscheinlichkeit in der SD-Zone ist gering. Ebenso sind hohe Expositionen zu verzeichnen, die eine letale Dosis mit sich bringen würden. Daher sollten Notfallmaßnahmen der Einsatzkräfte innerhalb der SD-Zone nicht angestrebt werden, bis die Strahlung erheblich gesunken ist (dies kann einige Tage dauern) und ein signifikanter Fortschritt bzgl. der Notfallreaktion in der MD-Zone zu verzeichnen ist.

Die Abb. 4.9 zeigt eine schematische Einteilung der Zonen nach einer 10 kT-Explosion und das Schadensausmaß umliegender Gebäude und Infrastrukturen.

Zu beachten ist, dass die Zonen keine klaren Grenzen aufweisen. Ebenso ist es möglich, dass Gebäude in der LD-Zone zerstört sind, während andere Gebäude in der MD-Zone noch intakt sind.

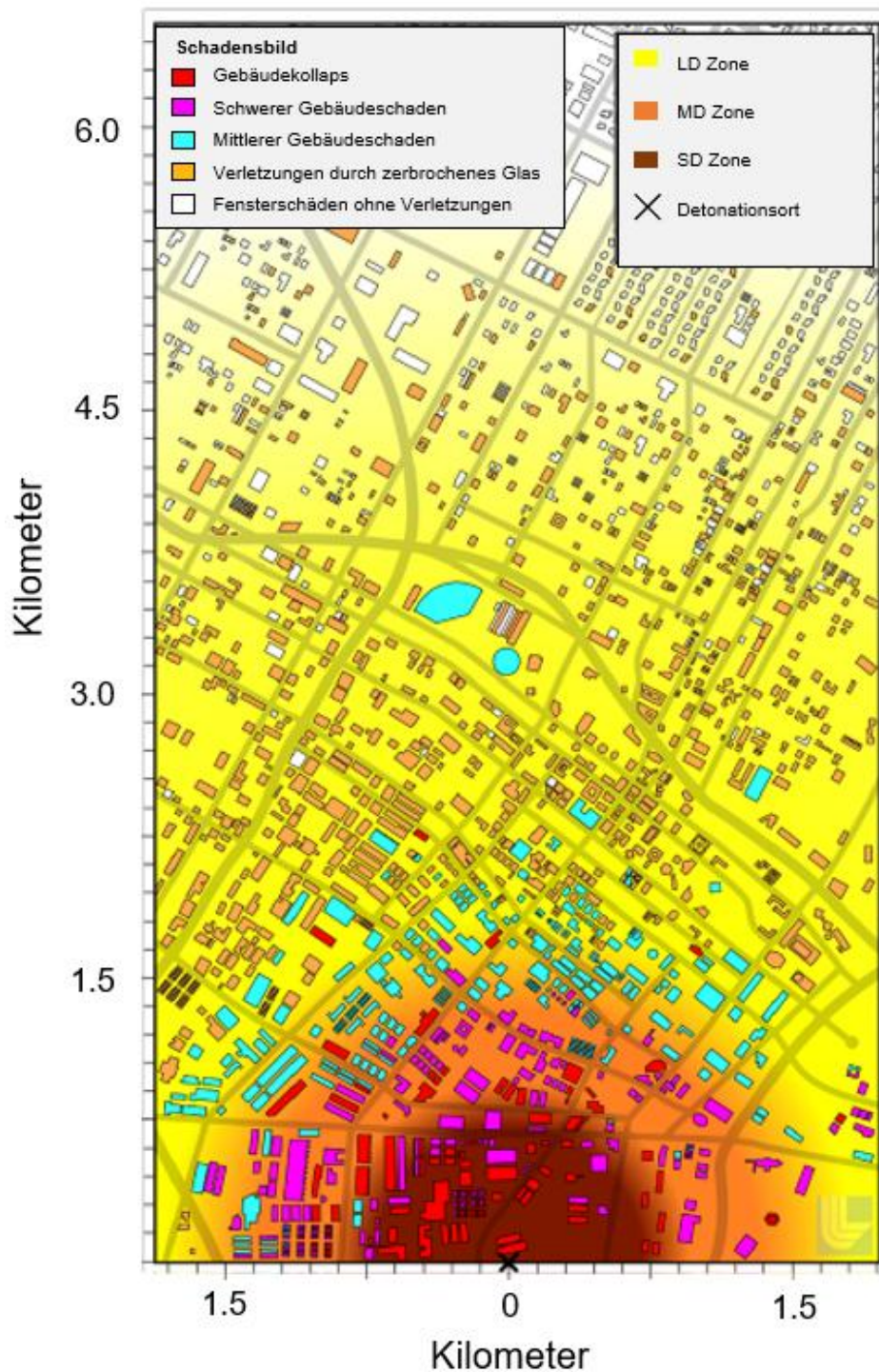


Abb. 4.9 Schematische Darstellung des Schadensausmaß in den drei Zonen LD, MD und SD /FEMA 10/

Die LD-, MD- und SD-Zone beschreiben qualitativ das zu erwartende Schadensausmaß aufgrund der mechanischen Einwirkungen der Explosion. Es können gemäß /FEMA 10/ zwei weitere Zonen ausgemacht werden, die die radiologischen Auswirkungen des Fall-outs charakterisieren. Das Ausmaß dieser beiden Zonen sollte durch Messungen von

Dosisleistungswerten bestimmt werden, um aufgrund festgelegter radiologischer Kriterien Schutzmaßnahmen und weitere Maßnahmen ableiten zu können.

- Gefährliche Fallout-Zone (engl.: Dangerous Fallout, kurz: DF-Zone)

Innerhalb der DF-Zone sind Dosisleistungen von mehr als 100 mSv/h möglich, die ein akutes Strahlensyndrom auslösen können. Innerhalb der ersten 1 bis 2 Stunden, wenn größere Partikel radioaktiven Materials zu Boden gesunken sind, wird sich abzeichnen, auf welchem Gebiet die DF-Zone zu erwarten ist. Die Zone erstreckt sich auf ca. 10 km Entfernung vom Detonationsort in Windrichtung. Innerhalb eines Tages wird die DF-Zone aufgrund des radioaktiven Zerfalls auf wenige Kilometer schrumpfen.

Notfallmaßnahmen in dieser Zone sollten nur erfolgen, wenn sie lebensrettend und mit den Schutzvorkehrungen der Einsatzkräfte zu vereinbaren sind. Die Öffentlichkeit sollte über Schutzmaßnahmen informiert werden. Wichtiger Bestandteil dieser Informationsübermittlung sind die Vorhaltung besonderer Kommunikationsmittel und die Nutzung effektiver Kommunikationspläne, die im besten Fall bereits in der radiologischen Notfallvorsorge etabliert worden sind. Die effektivste und erste Maßnahme unmittelbar nach einer nuklearen Explosion besteht darin, im nächstgelegenen und am besten schützenden Gebäude oder Bauwerk Schutz zu suchen und den Anweisungen der Behörden und Notfallorganisation zu folgen, bevor eine Evakuierung in Betracht gezogen wird. Hier lässt sich die Bedeutung der 7-Stunden-Regel gut ableiten: Bereits nach sieben Stunden ist die Dosisleistung auf ein Zehntel der ursprünglichen Dosisleistung abgesunken.

Dekontaminationsmaßnahmen sollten auf diejenigen Standorte und Infrastrukturen beschränkt werden, die zur Erreichung der Lebensrettung unbedingt benötigt werden.

- Heiße Zone (engl.: Hot Zone, kurz: H-Zone)

Innerhalb der H-Zone werden Dosisleistungen zwischen 100 μ Sv/h und 100 mSv/h erreicht. Die Zone kann sich in verschiedene Richtungen über hunderte von Kilometern erstrecken, allerdings beginnt die Zone durch den Zerfall des radioaktiven Materials innerhalb der ersten 24 Stunden zu schrumpfen.

Der Einsatz in der H-Zone wird vermutlich nicht zu akuten Strahlenschäden führen, allerdings sind längere Aufenthaltszeiten zu vermeiden. Auch können Maßnahmen in der Landwirtschaft und Wasserversorgung notwendig sein. Je nach Dosisleistung können Schutzmaßnahmen wie Aufenthalt in Gebäuden und Evakuierung in Bereichen mit geringerer Dosisleistung gerechtfertigt sein, um stochastische Schäden zu

vermeiden bzw. die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens zu verringern. Versorgungsstellen, Notfallunterkünfte und Informationsstellen für die Bevölkerung sollten nach Möglichkeit außerhalb der HZ eingerichtet werden.

Als Sekundäreffekt kann es durch Ionisierung der Luft aufgrund der emittierten Gammastrahlung zu einem EMP im Radiofrequenzbereich kommen. Der EMP hat bei einer Sprengkraft von 10 kT schätzungsweise eine Reichweite von bis zu 10 km Entfernung vom Detonationsort. In der unmittelbaren Umgebung um den Detonationsort (wenige Kilometer) wird die Überlebenschance für Menschen ohnehin sehr gering ausfallen, und Infrastrukturen werden zerstört sein. Der EMP wird vermutlich keine direkte gesundheitliche Bedrohung für den Menschen darstellen, jedoch können gesundheitsbezogene Geräte wie Herzschrittmacher, medizinische Geräte usw. durchaus betroffen sein. Auch die Telekommunikation über elektronische Geräte wird schwierig sein oder teilweise komplett ausfallen, was möglicherweise Kaskadeneffekte in den umliegenden Gebieten auslösen wird. Im Rahmen der Notfallvorsorge sollten solche Ausfälle (dies gilt auch für andere Notfallszenarien mit mutwilliger Zerstörung von Kommunikationsinfrastruktur) und mögliche alternative Kommunikationsmöglichkeiten bedacht werden.

In Abb. 4.10 sind für eine 10 kT Explosion die LD-, MD-, SD-, DF- sowie die H-Zone schematisch dargestellt. In Tab. 4.6 werden die Charakteristiken aller Zonen zusammengefasst.

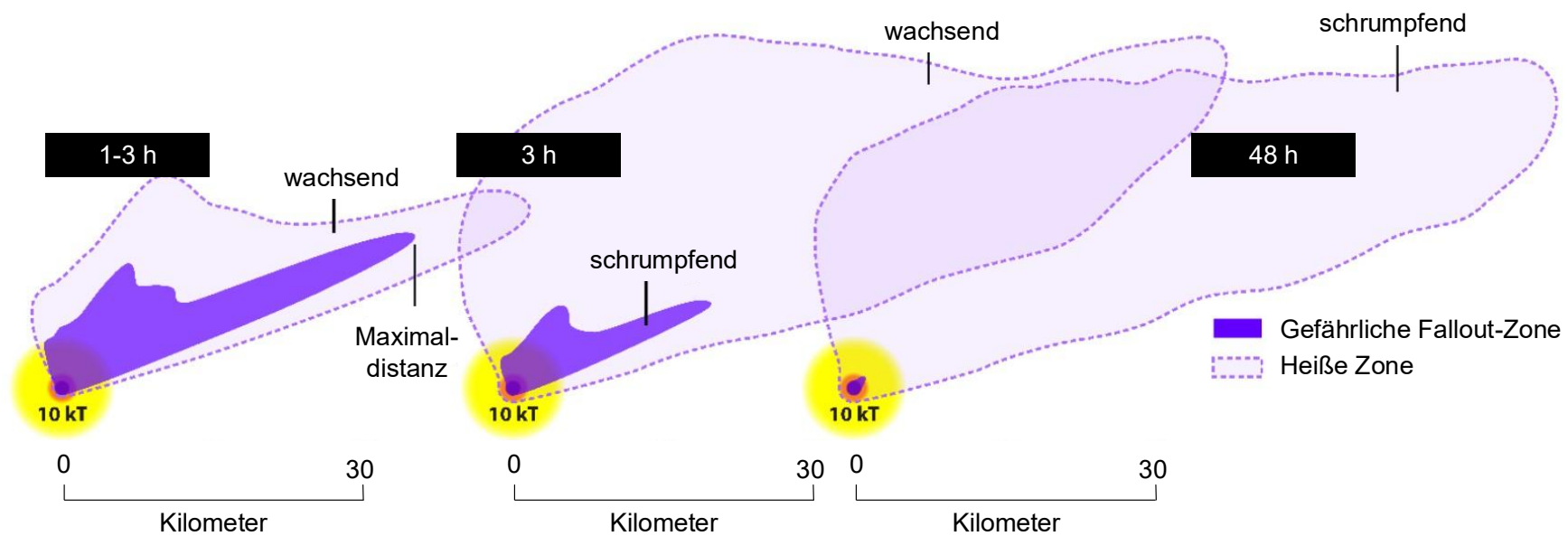


Abb. 4.10 Schematische Darstellung der Schadenszonen für eine 10 kT Nuklearwaffenexplosion mit zeitlichem Verlauf /FEMA 21/

Tab. 4.6 Eigenschaften der Schadenszonen und Fallout-Zonen am Beispiel einer 10 kT Kernwaffenexplosion

Bezeichnung	Abstand zum Detonationsort [km]	Charakteristiken und Eigenschaften
Schadenszonen		
LD	1,5 - 5	zerbrochene Fenster, Verletzungen meist nicht lebensbedrohlich
MD	1 - 1,5	signifikante Schäden an Gebäuden, Brände, traumatische Verletzungen und Strahlenexposition, bei medizinischer Versorgung hohe Überlebenschancen
SD	0 - 1	schwere Beschädigung bis Zerstörung von Gebäuden, wenige Überlebende, kein Betreten der SD durch Einsatzkräfte in den ersten Tagen
Fallout-Zonen		
DF	15 - 30	Dosisleistungen ~ 100 mSv/h, akute Strahlenkrankheit möglich, kann mit LD und MD überlappen
H	> 100	Dosisleistungen > 0,1 mSv/h, variabel und abhängig von den Wind- und Wetterlagen, schrumpft innerhalb der ersten 24 Stunden, ab hier: Persönliche Schutzausrüstung und Dosisüberwachung der Einsatzkräfte

Notfall- und Katastrophenschutzmaßnahmen nach einer Nuklearexplosion

Notfallmaßnahmen erstrecken sich bei einem Ereignis wie einer Kernwaffenexplosion in der Regel auf Maßnahmen, die den Fallout betreffen. Auswirkungen durch die Druckwelle, Direktstrahlung und thermische Strahlung zeigen sich bereits innerhalb weniger Sekunden bis Minuten nach Detonation. Bei diesem schnell ablaufenden Ereignis ist eine frühzeitige Notfallreaktion unmöglich.

Aufgrund der möglichen unterschiedlichen Wetterlagen, der geografischen Lage, der existierenden Infrastruktur und weiterer möglicher Faktoren kann die explizite Notfallreaktion bei einem solchen Ereignis unterschiedlich ausfallen.

Um allen vorherrschenden Umständen gerecht zu werden, ist es gemäß /FEMA 21/ sinnvoll, einen dreistufigen generischen Ansatz bei der Notfallvorsorge und -reaktion im Zusammenhang mit nuklearen Gefahrenlagen in Erwägung zu ziehen:

1. Information der Bevölkerung und Schutzkonzepte als Teil der Notfallvorsorge
Die Bevölkerung sollte über die möglichen Gefahren als auch die notwendigen ersten Schutzmaßnahmen als Teil der nuklearen Notfallvorsorge informiert werden. Es kann von großer Bedeutung sein, schon in der Notfallvorsorge Informationstexte, Meldungen und Evakuierungspläne vorab zu formulieren und festzulegen. Dazu zählt auch die Festlegung von öffentlichen Gebäuden, die als Schutzort gegen den Fallout dienen können.
2. Verhaltensempfehlungen während des Fallouts
Erstempfehlungen ohne oder mit sehr wenigen Informationen zum eingetretenen nuklearen Ereignis sollten innerhalb der ersten Stunde direkt nach Eintreten des Ereignisses durch die zuständigen Behörden und Notfallorganisationen an die Bevölkerung herangetragen werden. Dazu zählt insbesondere das sofortige Aufsuchen von Gebäuden als Schutzort.
3. Weitere Schutzmaßnahmen auf Basis weiterer Informationen zum Ereignis
Gestützt auf weiteren Informationen zum Hergang und Ausmaß des nuklearen Ereignisses (z. B. Prognosen zur Verteilung des Fallouts, Dosisleistungsmesswerte, Schutzmöglichkeiten) sollten weitere Empfehlungen für die Bevölkerung ausgesprochen werden. Dazu zählen unter anderem die gezielte Evakuierung von Menschen aus kontaminierten Gebieten ohne Schutzmöglichkeiten.

Nach /FEMA 21/ gibt zwei grundlegende Maßnahmen, um Menschen vor akuten Strahlenschäden durch den Fallout in den ersten 72 Stunden zu schützen: Schutz durch Aufenthalt in Gebäuden und Evakuierung.

Aufenthalt in Gebäuden

Die beste Erstmaßnahme nach einer nuklearen Explosion ist das Aufsuchen von nächstgelegenen Gebäuden und das Befolgen von Anweisungen durch die zuständigen Behörden und Einsatzkräften. Keller, Tiefgaragen oder Häuser mit mehreren Stockwerken können die Strahlendosis auf einen Bruchteil der Dosis ohne zusätzlichen Schutz reduzieren. Dabei entsprechen „Dosisreduktionsfaktoren“ dem Verhältnis der Dosis ohne Schutz zu der Dosis mit Schutz (siehe Abb. 4.11).

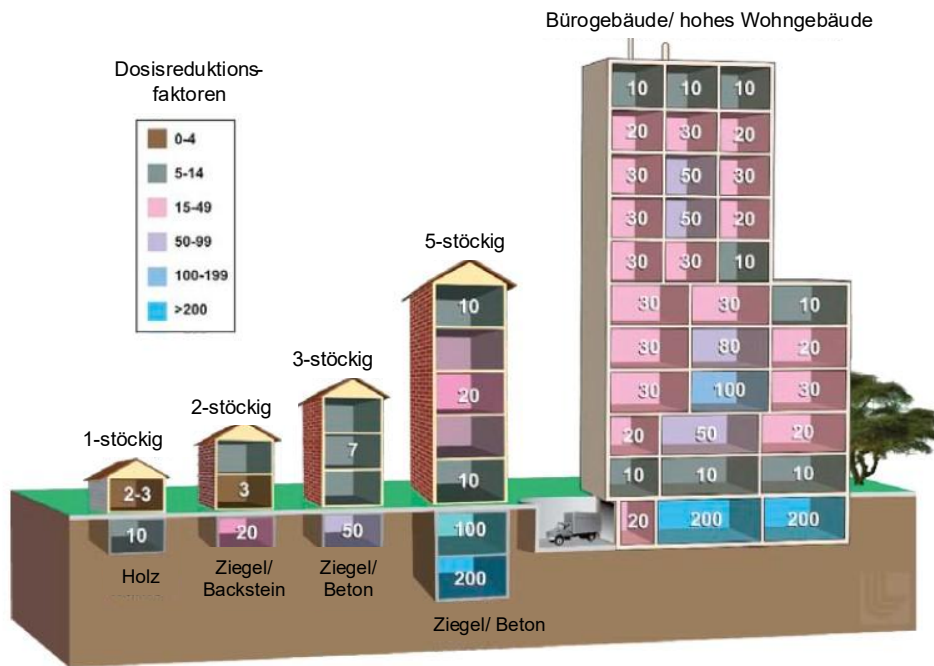


Abb. 4.11 Dosisreduktionsfaktoren für verschiedene Aufenthaltsorte innerhalb eines Gebäudes und für verschiedene Gebäudetypen /FEMA 21/

Man spricht von „angemessenem Schutz“, wenn die Abschirmung die Dosis signifikant reduziert. Vor allem in der DF-Zone stellen Wände aus Ziegelsteinen, Beton, Steinen und Erde eine angemessene Abschirmung dar, während Holz, Trockenwände und dünne Metallplatten (Autos und andere Fahrzeuge) weniger Schutz bieten. Betroffene sollten den Schutz von Gebäuden mindestens 24 Stunden aufsuchen und sich nicht selbst evakuieren, bis die zuständigen Behörden und Fachleute aufgrund weiterer Informationen zum Fallout Entwarnung geben können oder eine Evakuierung einleiten.

Evakuierung

Dort, wo der Aufenthalt in Gebäuden prinzipiell nicht möglich ist (da Gebäude eingestürzt oder Feuer ausgebrochen sind) oder die Exposition in der DF-Zone zu groß ist, sollte durch die zuständigen Einsatzkräfte eine Evakuierung vorgenommen werden. Die Evakuierung sollte lateral zur Ausbreitung der radioaktiven Wolke erfolgen, um den Abstand zur Quelle der Radioaktivität zu maximieren. Evakuierung sollte nie erfolgen, bevor genügend Informationen bezüglich der Verteilung des Fallouts und der entsprechenden Dosisleistung vorliegen. Frühe Evakuierung in den ersten 24 Stunden nach einer Detonation sollte nicht die primäre Maßnahme sein, wenn ein Schutz durch Gebäude oder andere Arten von Abschirmung vorhanden ist. Es sollte zunächst ein sinnvoll durchdach-

ter Evakuierungsplan auf Grundlage der Informationen bezüglich der Verteilung des Fallouts erstellt werden, der nicht mit anderen Notfallmaßnahmen wie das Löschen von Bränden kollidiert oder sogar die Gesundheit der Einsatzkräfte gefährdet.

Zeit ist ein wichtiger Faktor im Notfallmanagement, vor allem in den ersten Stunden nach einer Detonation, in der ein radioaktiver Fallout eine hohe Strahlenexposition mit sich bringt. Wichtige Schritte bei der Planung und Durchführung einer frühen Evakuierung sind gemäß /FEMA 21/:

- **Bewertung der radiologischen Lage**
Bevor eine Evakuierung in die Wege geleitet werden kann, muss die radiologische Lage durch Messungen der Dosisleistungen, der Wetterlage und anschließende Prognose der Verbreitung der Radioaktivität bewertet werden. Es soll verhindert werden, dass betroffene Menschen in jene Richtungen evakuiert werden, in denen die Strahlenexposition höher ist als an ihren – wenn auch nicht angemessenen – Schutzorten. Erste Prognosen zur Ausbreitung und Ablagerung des Fallouts sollten den Einsatzkräften so schnell wie möglich mitgeteilt und dann stündlich aktualisiert werden.
- **Prioritäre Evakuierung**
Personen in Gebäuden oder Unterkünften, die aus radiologischer Sicht einen geringen Schutz bieten (Dosisreduktionsfaktoren < 2) und sich innerhalb der DF-Zone befinden, sollten vorrangig frühzeitig evakuiert werden.
- **Zuführung in Schutzunterkünfte**
Zu evakuierende Personen sollten sich draußen nicht länger als 30 Minuten aufhalten. Schutzunterkünfte sollten einen Dosisreduktionsfaktor von mindestens 10 bieten. Um den Nutzen der Überführung in ein Gebäude gegen das ausgesetzte Risiko der Strahlenexposition außerhalb von Gebäuden abzuwägen, ist im Rahmen Notfallvorsorge eine Bewertung hinsichtlich der Effektivität und Angemessenheit von Notunterkünften von großer Bedeutung.
- **Erkennen von Gefahren einer frühen Evakuierung**
In den ersten Stunden nach einer Detonation ist es wahrscheinlich, dass wenige Informationen zur möglichen Strahlenexposition und zum weiteren Verlauf des Fallouts vorliegen. Menschen könnten in Gebiete transferiert werden, in der die Exposi-

tion höher ist als in den Gebieten, aus denen sie kamen. Trümmer könnten Evakuierungsrouten versperren, Kommunikationskanäle könnten außer Betrieb sein, um Menschen in der DF-Zone zu warnen.

- Information der Betroffenen in der DF-Zone

Betroffene innerhalb der DF-Zone könnten sich trotz Warnungen selbst evakuieren. Diese sollten durch die Einsatzkräfte bezüglich des Zustands möglicher Fluchtwege, des Gefährdungspotentials einstürzender Gebäude informiert werden. Wenn möglich sollten Betroffene in der DF-Zone davon abgehalten werden, ihre Unterkunft zu verlassen.

Unterschiedliche Schutzunterbringung bieten unterschiedliche Dosisreduktionsfaktoren. Es scheint daher sinnvoll, Menschen aus einem Bereich mit geringem Reduktionsfaktor in einen Bereich mit höherem Reduktionsfaktor bzw. in nicht kontaminierte Gebiete zu evakuieren. Allerdings werden die Betroffenen bei der Evakuierung der Strahlung durch den Fallout ausgesetzt. Aus diesem Zusammenspiel ergibt sich ein optimaler Zeitpunkt der Evakuierung, bei dem die Gesamtdosis durch den Aufenthalt in den einzelnen Bereichen minimiert wird. Der optimale Zeitpunkt t_{opt} (nach Detonation) ergibt sich nach /NATO 14/ zu:

$$t_{\text{opt}} = \text{MF} * t_{\text{ev}},$$

Der Multiplikationsfaktor MF ergibt sich aus dem Verhältnis aus dem Transmissionsfaktor in der Schutzunterkunft TF_S und dem Transmissionsfaktor während der Evakuierung TF_ev (siehe Abb. 4.12). In Tab. 4.7 sind Beispiele von Transmissionsfaktoren für eine Auswahl an Schutzunterkünften aufgelistet.

Für den Fall, dass sich eine Person in einem Keller eines Holzhauses aufhält und innerhalb von 30 Minuten in einem PKW aus dem kontaminierten Gebiet evakuiert wird, ergibt sich folgender optimaler Evakuierungszeitpunkt:

$$t_{\text{opt}} = \text{MF} * t_{\text{ev}} = 4,5 * 0,5 \text{ h} = 2 \text{ h } 15 \text{ min}$$

mit $\text{MF} = 4,5$, da $R_\text{T} = \text{TF}_\text{S} / \text{TF}_\text{ev} = 0,1 / 0,8 = 0,125$ (vgl. Abb. 4.12).

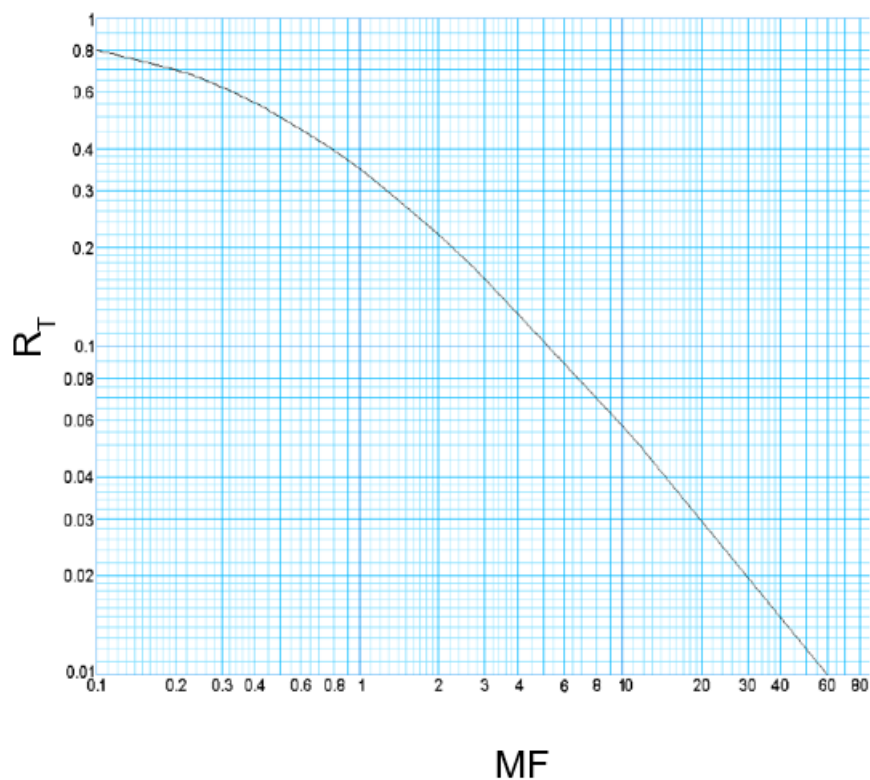


Abb. 4.12 Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Transmissionsfaktoren R_T und dem Multiplikationsfaktor MF /NATO 14/

Tab. 4.7 Transmissionsfaktoren und Dosisreduktionsfaktoren für verschiedene Schutzunterkünfte /NATO 14/, /FEMA 21/

Schutzunterkunft	Transmissionsfaktor	Dosisreduktionsfaktor
PKW	0,8	1,25
LKW (5 t)	0,5	2
Hochhaus mittleres Stockwerk	0,0125	80
Hochhaus erstes Stockwerk	0,1	10
Holzhaus erstes Stockwerk	0,6	1,67
Holzhaus Keller	0,1	10
U-Bahn-Station	0,0002	5000
Wald	0,8	1,25
Fuchsbau	0,1	10

Medizinische Versorgung

Die große Zahl an Opfern und Verletzten, die eine Kernwaffenexplosion verursacht, wird das lokale medizinische Versorgungssystem vor große Herausforderungen stellen. Es

kann sein, dass zehntausende Menschen sofortige lebensrettende Hilfe benötigen, weitere hunderttausende benötigen u. U. medizinische und psychosoziale Betreuung. Verletzungen sind je nach Schadenszone, aber auch innerhalb der Zonen unterschiedlich. Ein Großteil der lebensrettenden Maßnahmen nach der Detonation besteht darin, Menschen zu finden und zu behandeln, deren Verletzungen so schwer sind, dass sie ohne Behandlung zum Tod führen würden. Diese Bevölkerungsgruppe ist in der MD-Zone verhältnismäßig am größten vertreten.

Nach einer nuklearen Detonation sind drei Hauptarten von Verletzungen zu erwarten:

1. Physisches Trauma
2. Verbrennungen
3. Strahlenverletzungen, einschließlich kutaner Strahlenverletzungen (z. B. Strahlenverbrennungen) und des akuten Strahlensyndroms

Unter den folgenden aufgeführten Punkten werden grundlegende, aber nicht abschließende Maßnahmen der medizinischen Versorgung zusammengestellt. Eine umfassende Übersicht zur medizinischen Versorgung sowie zu allgemeinen technischen und organisatorischen Aspekten findet sich u. a. in der SSK-Empfehlung „Strahlennotfallmedizin Handbuch für medizinische Versorgung und Ausbildung“ /SSK 22a/. Des Weiteren werden im Forschungsvorhaben 3621S62520 der GRS „Überarbeitung des Maßnahmenkatalogs“ Maßnahmenblätter in den Sachbereichen Katastrophenschutz, medizinisches Management sowie Schutz der Einsatzkräfte als vorbereitende Dokumente für die besonderen Notfallpläne des Bundes nach § 99 Abs. 2 StrlSchG erarbeitet, die auch im Falle eines nuklearen Ereignisses angewandt würden.

- Rettung von Personen

Die Rettung von Personen aus Gefahrenbereichen und die Behandlung lebensbedrohlicher Verletzungen hat grundlegend Vorrang vor der Dekontamination und der Behandlung von Strahlenschäden. Dies gilt sowohl für die Bevölkerung als auch für Einsatzkräfte.

- Dekontamination

Die Dekontamination von Personen nach einer nuklearen Explosion ist im Allgemeinen nicht lebenswichtig. Das einfache Abbürsten der Oberbekleidung erscheint ausreichend, um sich selbst und andere zu schützen, bis eine gründlichere Dekontamination vorgenommen werden kann. Durch das Entfernen von Oberbekleidung und

Schuhen kann die Kontamination bereits um bis zu 90 % reduziert werden. Wenn möglich, sollten Personen, die zu einer medizinischen Einrichtung transportiert werden, dekontaminiert werden (mit Ausnahme der Wunden), um mögliche Kontaminationsverschleppung zu vermeiden. Zu den Dekontaminationsmaßnahmen für Einsatzkräfte nach einem Einsatz gehören u. a.

- das Entfernen und Entsorgen oder Waschen von Oberbekleidung, Stiefeln, Stiefelabdeckungen und Handschuhen,
- das Entfernen und Waschen oder Entsorgen von Innenbekleidung,
- das Duschen mit shampooierten Haaren und anschließender Entfernung der Atemschutzmaske in der Dusche sowie
- das Anziehen sauberer, kontaminationsfreier Kleidung nach der Dusche.

Kontaminierte Kleidung und Equipment sollte in doppelten Plastiktüten verstaut und diese in einem isolierten Raum zum Abklingen aufbewahrt werden. Kleidung oder Ausrüstung dürfen unter keinen Umständen mit Druckluft behandelt werden, da dies die Verunreinigung zerstreut und eine weitere Exposition verursacht.

- Medizinische (Folge-)Untersuchungen

Bei Anzeichen der akuten Strahlenkrankheit, u. a. Übelkeit, Erbrechen oder Diarrhoe, sollten Verantwortliche benachrichtigt, gefährliche Fallout-Gebiete gemieden und eine medizinische Einrichtung sofort aufgesucht werden. Der Zeitpunkt des ersten Erbrechens kann Aufschluss über die erhaltene Dosis geben.

Personen, die einer hohen Radioaktivität ausgesetzt waren, sollten über einen längeren Zeitraum gesundheitlich überwacht werden. Langzeiteffekte können z. B. Veränderung in der Blutzusammensetzung oder Krebserkrankungen sein. Die Biodosimetrie stellt eine nützliche Methode dar, mit deren Hilfe auf zytogenetischer und molekularer Ebene auf die exponierte Strahlendosis rückgeschlossen werden kann.

Es gibt verschiedene Therapieansätze in der Medizin, die der Strahlenkrankheit oder den Folgen von Strahlenschäden entgegenwirken können. Die Erfolgchancen sind abhängig vom Schweregrad des Strahleneffekts.

- Jodblockade

Die Nuklide im Fallout einer Kernwaffenexplosion unterscheiden sich von denen in der radioaktiven Wolke, die durch einen Kernkraftwerksunfall freigesetzt wird. Neben

den langlebigeren Radionukliden wie I-131 und Cs-137 besteht der Fallout überwiegend aus kurzlebigen Spaltprodukten, die in den ersten ein bis zwei Tagen die Gesamtaktivität zu ca. 90 % dominieren. Bei einem Fallout dominiert vor allem der Dosisbeitrag aus externer Strahlung. Der Beitrag aus Inhalation oder Ingestion macht nur einen geringen Anteil aus /KRA 13/. Dies liegt auch daran, dass ca. 90 % der Partikel im Fallout größer als 20 µm und damit nicht lungengängig sind /GLA 77/. Diese Art von Partikel beaufschlagen aber die oberen Atemwege und können damit zur Gesamtdosis beitragen.

Im Zuge des Angriffskrieges Russlands in der Ukraine im Februar 2022 ist sowohl in der breiten Öffentlichkeit als auch bei den Behörden die Frage des Einsatzes einer Jodblockade und partikelfiltrierenden Halbmasken bei Nuklearexplosionen aufgekommen. Die SSK hatte aus Anlass eines Beratungsauftrages durch das Bundesumweltministerium im März 2022 eine erste Stellungnahme formuliert. Die Ergebnisse stützen sich u. a. auf Berechnungen des BfS zum Verhältnis der Schilddrüsendosis durch Inhalation von Iod und der Schilddrüsendosis durch alle Expositionspfade (außer Ingestion) aller Nuklide. Konservativ wurden für den Vergleich die maximalen Dosen im Nahbereich herangezogen und die Altersgruppe von einem Jahr gewählt. Für die lungengängigen Partikel zeigte sich, dass die Inhalationsdosis der Schilddrüse durch Iod weniger als 10 % der Inhalationsdosis aller Nuklide über alle Pfade ausmacht. Die SSK kam zu dem Beratungsergebnis, dass in der ersten Phase nach einer Nuklearwaffenexplosion (einige Tage) die Maßnahme „Jodblockade“ allenfalls eine untergeordnete Rolle spielt und als Schutzmaßnahme vorläufig nicht als sinnvoll eingestuft wird. Zur Reduktion der Aufnahme von Radionukliden im Allgemeinen können die üblichen Maßnahmen des radiologischen Notfallschutzes wie der Verzicht der Aufnahme kontaminierter Lebensmittel, kontaminierten Trinkwassers, Dekontamination von Haut und Kleidung sowie das Tragen von partikelfiltrierenden Halbmasken wie FFP2-Masken oder höherer Schutzklasse in Betracht gezogen werden /SSK 22b/.

Es sei an dieser Stelle allerdings zu beachten, dass nicht-lungengängige Partikel bei Explosionen mit Bodenkontakt einen großen Anteil ausmachen. Bei Explosionen in der Höhe, ohne die Aufwirbelung von Boden, kann der Anteil an lungengängigen Partikeln größer ausfallen. In diesem Fall ist es jedoch auch wahrscheinlich, dass sich sehr kleine Partikel über längeren Zeitraum über sehr weite Strecken (mehrerer hunderte bis tausende Kilometer) in den Luftschichten über den Erdball verteilen.

4.2 Radiologische Gefahrenlagen durch militärische Angriffe auf kerntechnische Anlagen

Eine mutwillige Freisetzung einer erheblichen Menge an radioaktivem Material kann nicht nur durch den Einsatz und der Detonation einer Nuklearwaffe (Referenzszenario S14) erfolgen, sondern auch durch den Angriff auf eine kerntechnische Anlage (Referenzszenario S13). In diesem Kapitel erfolgen weitergehende Analysen zu einem exemplarischen Szenario im Zusammenhang mit dem Referenzszenario S13. Dabei wird der Ereignisablauf beschrieben, mögliche Freisetzungen sowie radiologische Auswirkungen auf Grundlage ereignisspezifischer Parameter abgeschätzt und einzuleitende Schutzmaßnahmen eruiert. Dabei wird auch geprüft, ob und inwiefern sich die Freisetzungsmechanismen und die daraus abzuleitenden Schutzmaßnahmen auf bereits untersuchte Unfallabläufe der Referenzszenarien S1 bis S4 überführen lassen.

Auch wenn die politische und mediale Bedeutung eines solchen Ereignisses enorm wäre, muss nicht jeder Angriff auf ein Kernkraftwerk eine unmittelbare Kernschmelze oder eine Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umgebung zu Folge haben /ZDF 22/. Für eine ernsthafte Bedrohungslage und Freisetzung von radioaktivem Material wäre der Ausfall mehrerer Sicherheitsfunktionen notwendig. Eine zentrale Rolle spielt hierbei die Kühlung der Brennelemente, die ihrerseits an die Stromversorgung der Reaktoren gebunden ist. Darüber hinaus sind mehrere Barrieren zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe vorgesehen. Erst bei Eintritt einer Ereigniskette, die diese Sicherheitsfunktionen beeinträchtigt, wäre möglicherweise mit einer Freisetzung zu rechnen. Nichtsdestotrotz, bei einem Unfall in einem Kernkraftwerk (Referenzszenarien S1 bis S4) würden alle Möglichkeiten ausgeschöpft, den Schaden einzudämmen bzw. zu verhindern. Bei einem vorsätzlichen Angriff würden vermutlich Sicherheitssysteme mutwillig zerstört, so dass auch Freisetzungsmechanismen in Frage kommen, die bei einem Kernkraftwerksunfall weniger wahrscheinlich sind.

Seit dem Angriff Russlands in der Ukraine im Februar 2022 ist die Frage nach der Sicherheit von in Betrieb befindlichen Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Anlagen – auch in Bezug auf mögliche radiologische Auswirkungen bei gezielten Angriffen – in den Fokus der Bevölkerung, der Medien sowie von Behörden und Fachorganisationen gerückt. Der Angriff Russlands auf die Ukraine zeigt, dass Bedrohungslagen im Zusammenhang mit vorsätzlichen Straftaten, Störmaßnahmen oder sonstigen Einwirkungen Dritter auch in Zukunft aufgrund angespannter politischer Lagen nicht gänzlich ausgeschlossen werden können.

In diesem exemplarischen Szenario wird als Ereignisablauf ein militärischer Angriff auf das Kernkraftwerk Saporischschja im Süden der Ukraine betrachtet. Zum einen wird diese Anlage gewählt, da aufgrund des Angriffskriegs Russlands in der Ukraine der GRS im Vorhabenzeitraum zu diesem Ereignisablauf punktuell Analysen vorliegen, zum anderen soll auch untersucht werden, welche radiologischen Auswirkungen ein solches Szenario im Ausland auch auf die Bundesrepublik Deutschland haben könnte.

Am 4. März 2022 informierte die ukrainische Aufsichtsbehörde (State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, SNRIU) die IAEA darüber, dass im Zuge des Angriffskriegs Russlands in der Ukraine russische Militärkräfte die Kontrolle über den Standort des Kernkraftwerks Saporischschja übernommen haben. Dabei kam es zu militärischen Auseinandersetzungen, bei denen ein Gebäudekomplex auf dem Gelände des Kernkraftwerks in Brand geriet. Seitdem kam es aufgrund von Beschüssen auf kritische Infrastrukturen immer wieder zu Ausfällen der Stromversorgung, so dass die Anlage im Laufe der militärischen Auseinandersetzungen über Notstromdieselgeneratoren versorgt werden musste. Die GRS berichtete über den Verlauf kontinuierlich auf ihrer Website, u. a. im Infobereich Ukraine.

Das untersuchte exemplarische Szenario orientiert sich dabei an den oben erläuterten realen Ereignissen und beschreibt einen totalen Stromausfall der externen Stromversorgung, sowie der Notstromdiesel der Anlage aufgrund militärischer Angriffe auf die kritische Infrastruktur um das Kernkraftwerk. Die Folge dieses Ereignisablaufs sind das Versagen der aktiven Sicherheitssysteme im Kernkraftwerk, was zu einer Kernschmelze und zum Versagen des Reaktordruckbehälters (RDB) mit potenziellen Freisetzungen von radioaktiven Stoffen in die Umwelt führt. Darüber hinaus können einwirkungsbedingte Beschädigungen des Containments deutlich höhere Freisetzungsmengen zur Folge haben. Weitere Annahmen und Erläuterungen werden erfolgen im Kapitel 4.2.1.

Das Kernkraftwerk Saporischschja ist mit seinen sechs Druckwasserreaktoren (DWR) von je 950 MW Nettoleistung (3000 MW thermische Leistung) das leistungstärkste Kernkraftwerk Europas. Das Kernkraftwerk befindet sich im Südosten der Ukraine am Fluss Dnipro. Kühlwasser entnimmt das Kernkraftwerk dem Kachowkaer Stausee. Die Reaktoren gehören der russischen Baureihe WWER-1000/320 an. Betreiber des Kernkraftwerks ist die National Nuclear Energy Generating Company Energoatom.

4.2.1 Quelltermabschätzungen

Die Aussagekraft zu möglichen Freisetzungen und Auswirkungen aufgrund der Einwirkungen auf Kernkraftwerke mit militärischen Mitteln ist begrenzt. Dies hängt auch damit zusammen, dass es in der Geschichte der Kernenergie vor dem Ukraine-Krieg keine mutwilligen Angriffe auf in Betrieb befindliche Kernkraftwerke zur Stromerzeugung gegeben hat und entsprechende Erfahrungswerte fehlen. Daher sind bislang keine Detailanalysen zu Ereignisabläufen verfügbar, die auf unterstellten Einwirkungen infolge militärischer Angriffe basieren. Eine Abschätzung möglicher Freisetzungen ist daher auf die Übertragung von Erkenntnissen aus analysierten unfallbedingten Ereignisabläufen angewiesen, die im Rahmen deterministischer bzw. probabilistischer Sicherheitsanalysen untersucht wurden. Daher beruhen entsprechende Abschätzungen zum Teil auf konservativen Annahmen und sind mit Unsicherheiten behaftet.

Ergänzend zur deterministischen Sicherheitsbewertung wird die probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) als wichtiges Instrument der Sicherheitsbewertung genutzt. Mit einer PSA werden die für die Anlagensicherheit entscheidenden Einflüsse aus Anlagentechnik, Betriebsführung und Betriebserfahrung in einem systematischen Ansatz zusammengeführt und die Analyseunsicherheiten so weit wie möglich quantitativ ermittelt. Von der GRS werden die Methoden der Sicherheitsbewertung laufend fortgeschrieben. Die Arbeiten der GRS beziehen sich dabei auf unterschiedliche sicherheitsrelevante Fachgebiete und umfassen die heute für eine Sicherheitsbewertung erforderliche Kombination aus deterministischen und probabilistischen Methoden /GRS 01/.

Zur Identifikation relevanter Unfallabläufe mit Kernschäden und erheblicher Radionuklidfreisetzung wurden die Ergebnisse der PSA u. a. für eine DWR-Referenzanlage des Typen Konvoi herangezogen. In dieser PSA der Stufe 2 wurden die ermittelten Unfallabläufe entsprechend des jeweiligen Freisetzungspfads in die Umgebung und des zu erwartenden Quellterms in acht verschiedene Freisetzungskategorien (FK) unterteilt (siehe Tab. 4.8). Dabei ist zu beachten, dass in jeder FK sehr unterschiedliche Unfallabläufe zusammengefasst sein können, die jedoch zu größenordnungsmäßig ähnlichen potenziellen Freisetzungen führen. Die FK mit dem größten Freisetzungsanteil ist die FKA /LÖF 10/.

Tab. 4.8 DWR-Freisetzungskategorien sortiert nach Jod-Freisetzungsanteil
/LÖF 10/

Werte teilweise gerundet.

Freisetzungskategorie	Freisetzungsanteile		
	Jod	Cäsium	Edelgase
FKA	0,1...> 0,5	0,1...> 0,5	0,24...≈ 1
FKB	0,14...0,23	0,13...0,24	≈ 1
FKE	0,055	2,4E-04...6E-3	≈ 0,9
FKF	0,0275	6E-06...1,2E-4	≈ 0,9
FKC	0,015	0,02...0,5	≈ 1
FKH	0,0001	2E-07...1E-5	≈ 0,9
FKI	0,0001	2E-07...1E-5	≈ 0,9
FKJ	0,0001	3E-10...2E-8	≈ 0,9

Typische Unfallabläufe in der FKA sind zum einen das Versagen des RDB unter Hochdruck mit Beschädigung des Sicherheitsbehälters und Folgeschäden am Ringraum, zum anderen der Dampferzeugerheizrohrbruch (DEHEIRO) mit von Wasser unbedeckter Leckstelle. Das relativ häufigere auslösende Ereignis ist der DEHEIRO. Dieser Freisetzungspfad wird als Grundlage für den derzeitigen RODOS-Eingabedatensatz verwendet und wird als repräsentativ für die FKA übernommen. Die Freisetzung durch den DEHEIRO ist geringer als der in Tab. 4.8 für FKA summarisch genannte Wert von > 50 % bei Versagen des RDB. Letzterer Unfallablauf ist jedoch denkbar, vor allem wenn unter solchen Bedingungen wie einer militärischen Besetzung eines Kernkraftwerks oder der Unmöglichkeit des Personals, alle erdenklichen Arbeitsschritte, die dem Schutz der Anlage und der Prävention von Schäden dienen könnten, zu leisten, z. B. Maßnahmen wie die Druckentlastung des RDB nicht durchgeführt werden können. In Summe lässt das die Schlussfolgerung zu, dass der in RODOS hinterlegte FKA-Quellterm bestimmte pessimistische Freisetzungsszenarien – deren unfallbedingtes Eintreten äußerst unwahrscheinlich ist, die jedoch als Folge absichtlicher militärischer Einwirkungen nicht auszuschließen sind – nicht abdeckt /LÖF 10/.

Im Zuge der Ereignisse am Kernkraftwerk Saporischschja wurden seitens der GRS erste grobe Abschätzungen zu potenziellen Freisetzungen bei postulierten Unfällen in generischen Kernkraftwerken der Baureihe WWER-1000 vorgenommen /ARN 22/. Die Abschätzungen beruhen auf Modellrechnungen mit dem Programmpaket AC², mit dem

Stör- und Unfälle – einschließlich der Reaktion der Anlage auf unterschiedliche Ereignisse wie Lecks oder Ausfall verschiedener Systeme sowie Vorgänge im Sicherheitsbehälter mit Freisetzung radioaktiver Stoffe – simuliert werden können. Für die Simulationen mussten zum Teil vereinfachende Annahmen und Skalierungen vorgenommen werden, um die Ereignisabläufe an die Bedingungen der Situation im und am Kernkraftwerk Saporischschja, insbesondere zu möglichen Einwirkungen und zur Rückhaltung von Spaltprodukten in der Anlage, anzupassen.

Als gemeinsame Basis für die Analyse von Ereignisabläufen in einem generischen Kernreaktor der Baureihe WWER-1000 und die Abschätzung von Quelltermen wird ein totaler Ausfall der Spannungsversorgung (Station Black Out, SBO) angenommen. Dieses auslösende Ereignis wird bei der Analyse schwerer unfallbedingter Ereignisabläufe betrachtet, ist jedoch auch als Folge militärischer Aktivitäten um ein Kernkraftwerk, die zur Zerstörung kritischer Infrastrukturen und zu einem Ausfall der Stromversorgung führen, in Betracht zu ziehen. Dabei wird zusätzlich zum Ausfall der externen Stromversorgung ein Versagen der Notstromdiesel unterstellt

Der SBO führt zum Versagen der elektrisch betriebenen aktiven Sicherheitssysteme, insbesondere der Kühlung. Hiervon können sowohl der Reaktor als auch das Brennelement-Lagerbecken betroffen sein. Deswegen werden beide Bereiche durch jeweils eigene Analysen betrachtet.

Darüber hinaus können potenzielle militärische Einwirkungen unterschiedliche Schadenszustände der zur Umschließung des radioaktiven Inventars vorgesehenen Barrieren bewirken. Für eine erste Einschätzung der möglichen Bandbreite resultierender Freisetzungen werden die folgenden zwei Varianten betrachtet, die sich auf den Zustand des Containments beziehen:

- Variante 1 beschreibt ein Versagen der Containment-Funktion bei Erreichen des Containmentdrucks. Hierbei wird als konservative Annahme keine Ablagerung von Spaltprodukten und kein Isotopenzerfall im Containment berücksichtigt, was zu einer Maximierung des Quellterms im betrachteten Zeitbereich führt. Außerdem wird konservativ angenommen, dass die gesamte zu diesem Zeitpunkt im Containment vorhandene Aktivität in kurzer Zeit (1 h) in die Umgebung ausgetragen wird.
- Variante 2 geht davon aus, dass das Containment intakt bleibt und als Handmaßnahme zur Druckentlastung ein ungefiltertes Containment-Venting durchgeführt wird.

Dieses Szenario basiert auf überschlägigen Abschätzungen, die auf einer Übertragung von Analyseergebnissen zu deutschen Anlagen beruhen. Dadurch werden anlagenspezifische Charakteristika nicht realistisch berücksichtigt.

So zeigen Ergebnisse aktueller Untersuchungen mit AC², dass auch bei Eintritt einer Kernschmelze der Containment-Auslegungsdruck möglicherweise nicht erreicht wird. Ein Venting des Containments wäre in diesem Fall nicht notwendig. Auf der anderen Seite können z. B. Abweichungen im Zeitverhalten, insbesondere eine schnellere Druckentlastung als das für deutsche Anlagen angenommene Venting-Intervall (40 h) zu deutlich höheren Freisetzen führen. Insgesamt lässt sich dennoch die Schlussfolgerung ziehen, dass die radiologischen Auswirkungen der Variante 2 in der Bandbreite unfallbedingter Abläufe mit einem ungefilterten Containment-Venting liegen.

Demgegenüber bildet Variante 1 mögliche charakteristische Unterschiede zwischen Ereignisabläufen aufgrund militärischer Einwirkungen und dem Großteil des Spektrums unfallbedingter Ereignisabläufe deutlicher ab. Implizit wird dabei auch berücksichtigt, dass ggf. anlageninterne Notfallmaßnahmen zur Verhinderung oder Reduzierung von Freisetzungen aufgrund militärischer Angriffe oder u. U. aufgrund militärischer Besetzung der Anlage nicht durchführbar sind. Die Freisetzungsmengen für Variante 1 fallen dementsprechend höher aus und decken eine große Bandbreite denkbarer Ereignisvarianten ab.

Die Tab. 4.9 fasst abgeschätzte Freisetzungsteile für den Reaktorkern und das Brennelement-Lagerbecken zusammen. Die Anteile beziehen sich auf das jeweilige Inventar zu Beginn des Ereignisablaufs. Die zugrunde liegenden Szenarien beziehen sich auf einen Ereigniseintritt während des Leistungsbetriebs der Anlage. Sie sind daher nicht repräsentativ für den Zustand der Anlage nach längeren Stillstandszeiten.

Tab. 4.9 Abgeschätzte Freisetzungssanteile für Reaktorkern und BE-Lagerbecken eines WWER-1000/320 Reaktors bei einem SBO-Fall aufgrund militärischer Einwirkungen für die Varianten 1 „Versagen der Containmentfunktion“ und 2 „Ungefiltertes Containment-Venting“ /ARN 22/

Nuklidgruppe (Leitnuklid)	Freisetzungssanteil			
	Reaktorkern		BE-Lagerbecken	
	Variante 1	Variante 2	Variante 1	Variante 2
Edelgase (X-133)	50 %	50 %	40 %	40 %
Jod (I-131)	30 %	2 %	50 %	5 %
an Schwebstoffe gebunden, leichtflüchtig (Cs-137)	50 %	0,5 %	> 90 %	1 %

Für die in PSA definierte Freisetzungskategorie FKA, bei der ein beschädigter Ringraum aufgrund von Beschädigungen des Sicherheitsbehälters zu Freisetzungen in die Umgebung führt, beträgt der Freisetzungssanteil von Jod > 0,5, für Cäsium > 0,5 und für Edelgase ungefähr 1 (siehe Tab. 4.8). Verglichen mit den Freisetzungssanteilen für die hier angenommenen Ereignisabläufe liegen die Freisetzungen für die Edelgase sowie für Jod um einen Faktor 1,5 bis 2 darunter, für Cäsium sind die Freisetzungssanteile nahezu identisch. Der FKA-Quellterm bzw. die zum FKA zugehörigen Freisetzungssanteile bilden daher für die Notfallreaktion eine realitätsnahe erste Abschätzung und ebenso eine konservative Annahme bezüglich der Freisetzungen bei diesem exemplarischen Szenario beschriebenen Ereignisablauf.

4.2.2 Freisetzungen und radiologische Auswirkungen

Ein entscheidender Parameter bezüglich der Abschätzung möglicher Freisetzungen und radiologischer Folgen bei dem betrachteten exemplarischen Szenario ist das Inventar der kerntechnischen Einrichtung, die von einem mutwilligen Angriffsszenario betroffen ist (siehe auch Kapitel 3.2.1). Für einen typischen sich in Betrieb befindlichen DWR liegt das Inventar beispielsweise um mehrere Größenordnungen über dem eines Zwischenlagers mit abgebrannten Brennelementen oder eines Forschungsreaktors. Die Betrachtung eines Angriffs auf ein Kernkraftwerk stellt somit eine Art Worst-Case-Szenario bezüglich der Art der Anlage und damit einhergehend der Menge an Freisetzungen dar. Kerntechnische Anlagen mit geringerem Inventar, z. B. Forschungsreaktoren, sind bezüglich möglicher Auswirkungen und Notfallreaktion damit abgedeckt.

Nach Einschätzungen des BfS wären die radiologischen Auswirkungen einer Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem Kernkraftwerk Saporischja für Deutschland begrenzt. Für den Fall, dass es zu erheblichen Freisetzen kommt, und bei für Deutschland ungünstiger Wetterlage könnte es zu Überschreitungen der EU-Höchstwerte für Nahrungsmittel kommen, die eine Kontrolle oder ggf. zu Vermarktungsverboten von Produkten erforderlich machen würde. Weitergehende notwendige Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung seien nach den Berechnungen des BfS nicht zu erwarten /HAN 22/.

4.2.3 Anlagenexterne Notfallreaktion und Schutzmaßnahmen

Bei einem Unfallablauf in einem Kernkraftwerk (Referenzszenarien S1 bis S4) werden alle Möglichkeiten ausgeschöpft, um den möglichen Schaden einzudämmen bzw. zu verhindern. Dabei kommen alle notwendigen anlageninternen Notfallmaßnahmen zum Tragen. Beim Referenzszenario S13, insbesondere bei diesem exemplarischen Szenario, werden mutwillig Sicherheitssysteme zerstört, so dass die Anlage im schlimmsten Falle nicht mehr in einen sicheren Zustand überführt werden kann. Zu berücksichtigen sind bei diesem exemplarischen Szenario auch die Mitarbeitenden in der Anlage, die u. U. ihre Aufgaben aufgrund von Erschöpfung, Angst oder anderweitiger Bedrohungslagen nicht mehr im vollen Umfang ausführen können.

Die anlagenexterne Notfallreaktion kann grundsätzlich auf die Referenzszenarien S1 bis S4 abgebildet werden. Bei erfolgten oder bevorstehenden Freisetzungen würden Katastrophenschutzmaßnahmen und weitere Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung durchgeführt werden. Aufgrund der jedoch sehr unklaren Situation aufgrund mangelnder und eingeschränkter Kommunikation mit dem Betreiber und Aufsichtsbehörden und evtl. fehlender Information bezüglich eingeleiteter Schutzmaßnahmen innerhalb der Anlage, Verlust von Schutzziele und Messwerten innerhalb und außerhalb der Anlage, kann die Unsicherheit hinsichtlich der möglichen oder erfolgten Freisetzungen groß ausfallen. Für mögliche Ausbreitungsrechnungen würde – ebenso wie bei einem Kernkraftwerksunfall, bei dem noch kein Quellterm durch den Betreiber vorliegt – zunächst der generische FKA-Quellterm als abdeckendes Szenario herangezogen werden, um Planungsgebiete zu eruieren.

5 Erfassungsmöglichkeiten für das Team Strahlenschutz

In diesem Kapitel erfolgt die Bewertung der identifizierten und analysierten Freisetzungsmechanismen und Ereignisabläufe in Bezug auf ihre Relevanz für die Erfassungsmöglichkeiten durch das Team Strahlenschutz des GRS-Notfallzentrums im Ereignisfall. Dabei wird vor allem untersucht, auf welche Weise die Freisetzungsverläufe im Ereignisfall durch Beobachtung, Messungen und Modellierung möglichst zeitnah und genau identifiziert, diagnostiziert und prognostiziert werden können. Dies geschieht insbesondere unter Berücksichtigung der verfügbaren Analyse- und Prognosetools.

5.1 Informationen von Betreibern, Behörden und Medien

Die vermutlich schnellsten Kommunikations- bzw. Informationswege, über die zeitnah Informationen in der ganzen Welt verteilt werden können, sind Social Media-Plattformen. Bei wesentlich bevorstehenden Bedrohungslagen, wie sie in den Kapiteln 4.1 und 4.2 geschildert sind, können zuständige Behörden, Betreiber von kerntechnischen Anlagen, Medien und weitere Stakeholder die ihnen zugänglichen Informationen über diese Plattformen in Echtzeit zur Verfügung stellen. In der ersten Phase des Angriffskriegs Russlands in der Ukraine hat das Team Strahlenschutz des GRS-Notfallteams beispielsweise stetig den Informationsfluss der ukrainischen Aufsichtsbehörde auf sozialen Medien und deren Internetseite verfolgt, um die Lage um das von russischen Streitkräften besetzte, stillgelegte Kernkraftwerk Tschernobyl einschätzen zu können.

Auch die Berichterstattung unabhängiger Medien kann neben den Aussagen von Behörden und Betreibern ein erster Anhaltspunkt für die Einschätzung und Bewertung der radiologischen Lage sein. Daher sollten alle an der Notfallreaktion beteiligten Stellen, insbesondere das RLZ-Bund, Nachrichten und Informationen im Internet, Fernsehen, Radio und weiteren etablierten Informationskanälen stetig verfolgen.

Neben den Social Media-Plattformen bieten die etablierten behördlichen Melde- und Informationswege eine Möglichkeit, Informationen über vermutete und erfolgte Freisetzungen auch bei mutwilligen Handlungen zu übermitteln. Das europäische Meldesystem European Community Urgent Radiological Information Exchange (ECURIE) und das Unified System for Information Exchange in Incidents and Emergencies (USIE) der IAEA sind hierbei zu nennen. Die ukrainische Behörde hat im Zuge des Angriffskriegs in der Ukraine auch Meldungen über das USIE-Meldeformular an die IAEA abgegeben, um

über die radiologische Situation zu berichten. Es sei an dieser Stelle jedoch auch zu erwähnen, dass vor allem bei militärischen Kampfhandlungen Informationswege nicht dauerhaft bespielt werden können und die Informationsdichte klein ausfallen kann.

Relevante Informationen, die im Zusammenhang mit nuklearen Gefahrenlagen von Betreibern, Behörden oder Medien übermittelt werden könnten, sind in Tab. 5.1 aufgelistet.

Bei der weiteren Verwendung und Bewertung der o. g. Informationen sollte immer mitbedacht werden, dass – vor allem bei politisch und militärisch angespannten Situationen – auch Falschmeldungen und Gerüchte verbreitet werden können. Informationen von Behörden, Betreibern, Medien und Einzelpersonen sollten daher von unabhängigen Dritten verifiziert werden bzw. worden sein. Solche Aussagen sind im besten Fall mit Beobachtungen, Messungen und/oder durch Prognosen oder Rückmodellierungen abzugleichen (siehe folgende Abschnitte). Es sei an dieser Stelle jedoch gesagt, dass auch Beobachtungen, Messungen und Prognosen seitens Dritter gefälscht oder manipuliert sein können.

Tab. 5.1 Auswahl relevanter Informationen zu den Gefahrenlagen aus Kapitel 4.1 (Kernwaffenexplosion) und Kapitel 4.2 (Angriff auf kerntechnische Anlagen)

Nuklearwaffenexplosionen	Angriff auf kerntechnische Anlagen
Drohungen/Gerüchte zum potenziellen Einsatz, z. B. durch: • terroristische Gruppe/Einzeltäter • eine Atommacht • Insider/Whistleblower	Drohungen/Gerüchte zum potenziellen Angriff, z. B. durch: • terroristische Gruppe/Einzeltäter • Aggressorstaaten • Insider/Whistleblower
Informationen zur (vermeintlichen) Waffentechnik wie: • strategisch/taktisch • Sprengkraft • Spaltmaterial	Betriebszustand der Anlage (sowohl technisch als auch personell): • Leistungsbetrieb/Inselbetrieb • Personalkapazität • ggf. eingeleitete Notfallmaßnahmen
Informationen zum möglichen Detonationsort und zur möglichen Detonationszeit	Verletzung von Schutzzielen wie der Erhalt von: • Barrieren • Kühlung • Reaktivität

5.2 Beobachtungen im Zusammenhang mit nuklearen Gefahrenlagen

Bei Gefahrenlagen nach den Kapiteln 4.1 und 4.2 ist es möglich, gewisse Beobachtungen zu machen, die auf die (bevorstehende) radiologische Lage schließen lassen. Diese Beobachtungen können im besten Fall aufgezeichnet worden sein (z. B. Videomaterial), um sie im weiteren Verlauf als Analyse- und Prognosematerial zu verwenden. Im Jahr 2001 wurden von mehreren Privatpersonen beispielsweise der gezielte Flugzeugabsturz auf das World Trade Center auf Video aufgezeichnet, mit Hilfe dessen u. a. der zeitliche Verlauf und die Auswirkungen rekonstruiert und in Zusammenhang gebracht werden konnten. Auch seitens der Medien wurde das Geschehen, insbesondere der Zustand des Gebäudes, mittels Videokameras in Helikoptern oder auf nebenstehenden Gebäuden beobachtet. Heutzutage wäre eine Beobachtung mittels Drohnen aus sicherer Entfernung denkbar. Auch Satellitendaten können Rückschluss auf den Zustand bzw. die Lage vor Ort geben.

Die Bedrohungslagen nach Kapitel 4.1 und 4.2 unterscheiden sich hinsichtlich eines Aspektes wesentlich: die Beobachtungen in Kapitel 4.2 können Aufschluss darüber geben, mit welchen Freisetzungen zu rechnen ist (prospektiv), während die Beobachtungen in Kapitel 4.1, insbesondere hinsichtlich der zu beobachtenden Wolkenbildung und der mechanischen Zerstörungen, nur Rückschluss auf die bereits freigesetzte Menge an Radioaktivität geben können (retrospektiv). Im Falle von Kapitel 4.2 wäre eine gewisse vorsorgliche Notfallreaktion, wie auch bei den Referenzszenarien S1 bis S5, möglich (frühzeitige Evakuierung aus der Zentralzone, Verteilung von Jodtabletten), während es bei Kapitel 4.1 vermutlich keine „Vorwarnphase“ gebe. Die Notfallreaktionen würden sich darauf erstrecken, Zonen ausfindig zu machen, in denen eine Rettung von Menschenleben nicht mehr möglich wäre, da diese so gut wie keine Überlebenschance haben, Zonen, in denen Menschen bevorzugt gerettet werden sollten, da sie eine zeitnahe medizinische Versorgung benötigen, um zu überleben, Zonen, in die sich Einsatzkräfte aufgrund der hohen Dosisleistung nicht begeben sollten und Zonen, in denen einen erhöhter Fallout zu erwarten ist und in denen Schutzmaßnahmen notwendig wären. Eine gezielte Ankündigung des Einsatzes einer Nuklearwaffe, bei der eine frühzeitige Evakuierung von Menschen möglich wäre, ist bei diesen Gefahrenlagen eher unwahrscheinlich.

Tab. 5.2 Auswahl relevanter Beobachtungen bei den Gefahrenlagen nach Kapitel 4.1 (Kernwaffenexplosion) und Kapitel 4.2 (Angriff auf kerntechnische Anlagen)

Nuklearwaffenexplosionen	Angriff auf kerntechnische Anlagen
Beobachtungen, die mit den in Tab. 5.1 aufgeführten Informationen im Einklang stehen: • Mobilmachung von militärischen Truppen • Positionierung von Waffen/Waffensystemen	Beobachtungen, die mit den in Tab. 5.1 aufgeführten Informationen im Einklang stehen: • Mobilmachung von militärischen Truppen • Positionierung von Waffen/Waffensystemen
Beobachtungen nach einer Detonation wie: • Wolkenbildung („Atompilz“) • beschädigte Infrastrukturen • verletzte Personen	Beobachtungen nach einem Angriff wie: • mechanische Beschädigungen von Gebäudestrukturen und Systemkomponenten durch Geschosse • Brände • verletzte Personen

5.3 Messsysteme

Es ist möglich, Messungen radiologischer, aber auch nicht-radiologischer Größen heranzuziehen, um Rückschluss auf den Einsatz von Nuklearwaffen oder die Freisetzung von radioaktivem Material im Zusammenhang mit dem Angriff auf kerntechnische Anlagen zu ziehen. Im Februar 2022 hat das Team Strahlenschutz des Notfallzentrums der GRS die radiologische Lage um das havarierte Kernkraftwerk Tschernobyl verfolgt, als russische Truppen in das Gebiet einmarschiert sind. Dazu hat es sich beispielsweise auch auf das ukrainische Messsystem zur Messung der Ortsdosisleistung in der Sperrzone um das Kernkraftwerk Tschernobyl gestützt.

Messungen zur Bestimmung der Umweltradioaktivität

Für Informationen zu eingetretenen Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Umwelt kann auf verschiedene etablierte Messsysteme zurückgegriffen werden. Diese Messsysteme können sowohl bei unklarer Situation (vgl. Einmarsch russischer Truppen in die Sperrzone), (vermeintlichen) Angriffen auf kerntechnische Anlagen oder bei vermuteten Nuklearexplosionen, die z. B. im Zusammenhang mit Waffentests stehen, verwendet werden. In Deutschland steht das ODL-Netz des BfS als Teil des integrierten Mess- und Informationssystems (IMIS) zur Verfügung, das ebenso die Radioaktivität in Boden und

Gewässern überwacht. Bei Ereignissen außerhalb Deutschlands kann entsprechend auf das Pendant der Europäischen Union, die European Radiological Data Exchange Platform (EURDEP), sowie auf das International Radiation Monitoring Information System (IRMIS) der IAEA zurückgegriffen werden. Messwerte der Umweltradioaktivität können einen ersten Anhaltspunkt dafür liefern, ob Freisetzungen erfolgt sind. Allerdings sollte an dieser Stelle auch darauf hingewiesen werden, dass solche Messsysteme vor allem bei militärischen Kampfhandlungen und Einflüssen durch Aggressoren ausfallen bzw. manipuliert werden könnten. Im Falle des russischen Angriffskriegs in der Ukraine sind Messstationen teilweise nicht verfügbar gewesen. Diese Umstände müssen bei der weiteren Bewertung der radiologischen Lage mitberücksichtigt werden.

Messungen von Anlagenparametern und weitere Anlageninformationen

Bei möglichen Angriffen auf kerntechnische Anlagen kann es hilfreich sein, sich einen ersten Überblick über Anlagenparameter zu verschaffen, um mögliche radiologische Konsequenzen abschätzen zu können.

In Deutschland steht das Kernreaktor-Fernüberwachungssystem (KFÜ) zur Verfügung, das neben der Überwachung von Aktivitätskonzentrationen und Ortsdosisleistungen in den Strahlenschutzbereichen weitere Daten, die Hinweise auf Einhaltung der Schutzziele geben können, enthält, beispielsweise die Kontrolle der Reaktivität des Reaktorkerns sowie der Brennelemente, die Kühlung der Brennelemente durch die Bereitstellung von Kühlmittel und Wärmesenken sowie der Einschluss radioaktiver Stoffe (Integrität der Barrieren).

Die von der GRS betriebene Wissensbasis für Notfälle (WINO) ist eine Datenbank mit im Notfall relevanten Anlageninformationen zu deutschen und europäischen Leistungsreaktoren. Diese enthalten u. a. Informationen zur Funktionsweise der Anlage, Sicherheitssystemen und Notfallmaßnahmen der jeweiligen Anlage.

Das Power Reactor Information System (PRIS) der IAEA stellt ebenso eine umfassende Datenbank über Leistungsreaktoren im Betrieb, im Bau oder Stilllegung dar, in der schnell und einfach Informationen über wesentliche Eigenschaften der Anlage abgerufen werden können. Eine ähnliche Plattform für Forschungsreaktoren ist die Research Reactor Database (RRDB) der IAEA.

Dosisprognose

Das BfS betreibt das Entscheidungshilfesystem RODOS („Realtime Online Decision Support System“) zur Ermittlung und Darstellung radiologischer Konsequenzen. Es berechnet in einem radiologischen Notfall die zukünftige Umweltkontamination und die zu erwartenden Dosen über alle relevanten externen und internen Expositionspfade. In RODOS können Quellterme und ausbreitungsrelevante Parameter hinterlegt werden, um so auch Dosisrekonstruktionen in Folge eines Fallouts durchzuführen.

Messungen nicht-radiologischer Parameter

Das Internationale Überwachungssystem (IMS) (siehe auch Kapitel 2.3.2) ist ein globales Mess-Netzwerk der CTBTO zur Detektion von Kernwaffenexplosionen, das bereits Kernwaffentests in Nordkorea nachweisen konnte. Es beinhaltet neben Radionuklid-Messstationen auch seismische, hydroakustische und infraschalldetektierende Messstationen, mit Hilfe derer Schall- und Schockwellen in Wasser, Luft und Boden nachgewiesen werden können. IMS bietet über das virtual Data Exploitation Centre (vDEC) Wissenschaftlern und Forschern Zugang zu den Daten von IMS. Allerdings muss vor der Nutzung eine Datenanfrage gestellt werden mit Informationen zum Zweck der Nutzung und zum Forschungsprojekt. Die Daten werden nur innerhalb der zeitlichen und geographischen Grenzen und für wissenschaftliche Projekte bereitgestellt, die von der CTBTO als durchführbar erachtet werden. Die Akquise von Daten scheint daher für eine schnelle Bewertung der Lage weniger sinnvoll. Von der CTBTO würde im Falle einer Detektion, die Rückschluss auf einen Nuklearwaffentest zulässt, vermutlich relevante Informationen veröffentlicht werden, dass gewisse Auslösekriterien überschritten worden sind. Für autorisierte Benutzer, dies sind im Wesentlichen die Ratifizierungsstaaten, bietet das Secure Web Portal Zugang zu IMS-Daten, Software, Dokumentation und anderen Informationen. Zugang erhalten die Ratifizierungsstaaten durch Einreichung eines Benennungsformulars. Messdaten von IMS können Aufschluss über Detonationsort, -zeit, und Waffentechnik geben und einen ersten Anhaltspunkt für eine vorläufige Abschätzung der radiologischen Auswirkung darstellen.

Eine Zusammenstellung weiterer Informationssysteme zur radiologischen Bewertung sowie zur Bewältigung radiologischer Notfallsituationen wurde im Forschungsvorhaben 3617S62561 „Untersuchungen zur Ablauforganisation in generischen Lagezentren“ erarbeitet und findet sich in tabellarischer Form im entsprechenden Abschlussbericht /DRV 20/.

5.4 Analyse- und Prognosetools

Im Falle einer nuklearen oder radiologischen Gefahrenlage sind neben diagnostischen Messsystemen und Informationen von Betreibern, Behörden und Medien Rechentools zur Prognose von radiologischen Auswirkungen sowie Tools zur Rückrechnung aus Messwerten ein probates Mittel, um schnelle Abschätzungen zur radiologischen Lage und Aussagen zum Verlauf der Situation machen zu können und Informationen zu validieren oder falsifizieren.

RAKEX

Im Rahmen dieses Vorhabens wurde eine erste Prototypversion eines Berechnungs- und Analysetools zur Abschätzung radiologischer und nicht-radiologischer Auswirkungen nach einer Kernwaffenexplosion (RAKEX) erstellt. Für die Abschätzung von Freisetzungen sowie zum radiologischen und mechanischen Schadensausmaß werden in RAKEX physikalische Zusammenhänge, mathematische Modelle bzw. empirische Daten herangezogen. Diese sind in Kapitel 4.1.2 beschrieben und beruhen im Wesentlichen auf /GLA 77/ und /NATO 14/. Das Tool hat nicht den Anspruch, exakte Berechnungen durchzuführen, sondern bietet auf Grundlage der genannten Modellierungen und Annahmen eine erste grobe Abschätzung (mit gewissen Ungenauigkeiten) zur radiologischen Lage und dem Schadensausmaß für die erste Phase nach einer Detonation bzw. im Vorfeld einer möglichen Eskalation.

Das Tool basiert auf einer Excel-Datei, deren Zugriff und Handhabung auf jedem den Mitarbeitenden des Teams Strahlenschutz zugänglichen Rechnern möglich ist. Auch werden für die Nutzung des Tools keine Kenntnisse in einer Programmiersprache vorausgesetzt. Die Nutzung des Tools basiert lediglich auf der Eingabe von Parameterwerten, die dem Anwender bekannt sind oder anzunehmen sind. Die Ausgabewerte berechneter Größen wie Schadensraden und Dosis(leistungs-)werte werden in einzelnen Tabellenblättern ausgegeben.

Das Tool kann im Hinblick auf neue Erkenntnisse bezüglich der Abschätzung von Freisetzungen und Auswirkungen fortlaufend erweitert und ergänzt bzw. in zukünftige Analysetools integriert werden.

NUKEMAP

NUKEMAP /WEL 22/ ist eine interaktive Karte auf einer frei zugänglichen Webseite, die von Alex Wellerstein, einem Wissenschaftshistoriker am Stevens Institute of Technology, erstellt und administriert wird. Die Karte simuliert das Ausmaß von Kernwaffen in der Nähe des vom Nutzer frei wählbaren Gelände, dazu zählen u. a. direkte Effekte wie Direktstrahlung, thermische Strahlung und Druckwelle aber auch ein Fallout-Modell und ein Modell zur Abschätzung von Opferzahlen. Die Datenbank enthält u. a. historisch zum Einsatz gekommene Kernwaffen mit entsprechender Sprengkraft.

Wellerstein erläutert auf der Webseite die Herkunft der Daten und Modellierung, die er in der Karte verwendet (einige Gleichungen resultieren aus seinen eigenen Kurvenanpassungen aus /GLA 77/). Allerdings ist die Vorgehensweise nicht vollständig nachvollziehbar und konnte in diesem Vorhaben nicht vollständig überprüft werden. Wählt man auf NUKEMAP eine Detonation mit Bodenkontakt mit einer Sprengkraft von 1 kT, so wird im Abstand von ca. 1100 m eine Dosis von 100 rem erreicht. Dies entspricht in guter Übereinstimmung den Angaben in /GLA 77/ bzgl. der Direktstrahlung durch Gammastrahlung, was darauf schließen lässt, dass Neutronenstrahlung bei den direkten radio-logischen Effekten nicht berücksichtigt wird.

Für eine qualitative und semi-quantitative Erstabschätzung bietet das Web-Tool die Möglichkeit, sich einen guten Überblick über die Auswirkungen zu verschaffen.

ORIGEN

Der Oak Ridge Isotope Generation (ORIGEN) Code des Oak Ridge National Laboratory (ORNL) ist ein validierter Code, der die Produktion und den radioaktiven Zerfall von Nukliden des Fallouts bei Nuklearwaffenexplosionen prognostiziert. Er berücksichtigt sowohl Spaltprodukte als auch Actinide und Aktivierungsprodukte aus dem Umgebungsmaterial. In den letzten Jahren wurde ORIGEN stetig verbessert. U. a. wurden die nuklearen Daten wie Zerfallsdaten und Spaltausbeuten aktualisiert. ORIGEN ist Teil des Fallout Analysis Tools, mit Hilfe dessen zeitabhängige Nuklidinventare des Fallouts berechnet und graphisch geplottet werden können. Der Zugang zum Programm wird von der OECD Nuclear Energy Agency (NEA) verwaltet. Der GRS steht das Programm am Standort Garching zur Verfügung.

LASAIR

Unter der Leitung des BfS und im Auftrag des Bundesumweltministeriums wurde im Jahr 2000 das Programm LASAIR (Lagrangian Simulation of the Dispersion and Inhalation of Radionuclides) entwickelt und seitdem kontinuierlich weiterentwickelt. Mit dem Programm können zeitnah Berechnungen zu Dispersion, Deposition und Exposition bei sofortigen Freisetzen gemacht werden /WAL 08/. Daraus kann auch abgeleitet werden, ob und bis zu welcher Entfernung vom Freisetzungsort Menschen evakuiert werden müssen. Zur Prognose der Dispersion von radioaktiven Partikeln und der resultierenden Exposition werden meteorologische und topographische Daten herangezogen. LASAIR kann jeweils fünf Radionuklide gleichzeitig berechnen und Ausbreitungsrechnungen bis 2000 m Höhe im Umkreis von 200 km durchführen. Daher bietet sich das Programm z. B. im Falle einer RDD (Referenzszenario S12) an, bei der wenige verschiedene Radionuklide und lokale Auswirkungen zu erwarten sind. Das Programm kann von den zuständigen Strahlenschutzbehörden genutzt werden. Aufgrund der implementierten topographischen Karten ist LASAIR grundsätzlich für den Einsatz in Deutschland gedacht, kann aber auch für andere Staaten mit allgemein verfügbaren Geobrowsern eingesetzt werden. In Übungen wurden von der GRS mit Hilfe von LASAIR bereits Konsequenzanalysen bei Transportunfällen durchgeführt /GRS 14/. Für großflächige Ausbreitungen eines Fallouts bei Nuklearwaffenexplosionen mit mehreren zehn relevanten Radionukliden sollte die Einsatzmöglichkeit von LASAIR geprüft werden.

In Erarbeitung befindliche Analyse- und Prognosetools

In dem im Vorhabenszeitraum laufenden Eigenforschungsvorhaben 3620S62501 „Erweiterung des Anwendungsbereichs der Werkzeuge zur Kombination anlagentechnischer und radiologischer Informationen zur Einschätzung von Freisetzen“ sollen – im Zuge der anhaltenden militärischen Kampfhandlungen in der Ukraine – die dem Team Strahlenschutz verfügbaren Informationen über den Bestand radioaktiver Stoffe in der Ukraine systematisch zu einer Wissensbasis ausgebaut werden, die eine zeitschnelle Bewertung möglicher radiologisch relevanter Ereignisse unter den besonderen Randbedingungen kriegsrischer Auseinandersetzungen ermöglicht. Die Wissensbasis soll im Anschluss in den Gesamtansatz des Vorhabens zur Unterstützung der Arbeit des Teams Strahlenschutz im Notfallzentrum der GRS eingebettet werden und als nutzbares Tool für das Team Strahlenschutz zur Verfügung stehen. Ziel ist, mit Hilfe dieses Tools zeit-

nahe Bewertungen bzgl. der Verwundbarkeit von Barriere- und Rückhaltefunktionen verschiedener kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen und radioaktiver Inventare durch unterschiedliche Einwirkungen treffen zu können.

In 2016 haben Mitarbeitende des Teams Strahlenschutz als Teil des BMWi-Vorhabens RS 1534 „Unfallablauf- und Quelltermanalysen: Untersuchungen zu den Ereignissen in Fukushima im Rahmen des OECD/NEA BSAF Projektes, Phase II“ /GRS 18/ Rekonstruktionsrechnungen von Freisetzungen durch den Kernkraftwerksunfall in Fukushima aus Messwerten durchgeführt. Anhand verfügbarer Daten wie Ortsdosisleistung, spezifische Bodenaktivität und Wetterparametern sowie mittels plausibler Annahmen und Modellansätzen wurden schrittweise Rückrechnungen durchgeführt, um einen Quellterm aus Wolkenstrahlung und Luftaktivitätskonzentration zu quantifizieren. Das Rückrechnungsverfahren bietet eine Basis für ein zukünftiges Analysetool zur Abschätzung von Quelltermen aus ODL-Daten bei kerntechnischen Notfällen und könnte zukünftig auch im Notfallzentrum der GRS genutzt werden. Bei einem mutwilligen Angriff auf eine kerntechnische Anlage scheint solch ein Analysetool besonders von Nutzen zu sein, da insbesondere bei solchen Gefahrenlagen eine Informationsweitergabe durch den Betreiber zum Zustand der Anlage nicht unbedingt gegeben ist und der Zugang zu Informationen und Angaben zum Quellterm durch den Betreiber u. U. nicht möglich ist.

6 Zusammenfassung

Zur Wahrnehmung seiner Aufgaben im GRS-Notfallzentrum stützt sich das Team Strahlenschutz der GRS im Wesentlichen auf seine Fachkompetenz, die im Rahmen verschiedener Vorhaben vor allem zur Analyse möglicher radiologischer Freisetzungen im Ereignisverlauf und zum Notfallschutz aufgebaut und weiterentwickelt wurde.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war, die Kompetenz des Team Strahlenschutz auf dem Gebiet der nuklearen Gefahrenlagen, insbesondere im Zusammenhang mit Kernwaffenexplosionen und Angriffen auf kerntechnische Anlagen, auszubauen, um auch bei unvorhersehbaren Ereignisabläufen oder bisher in der Planung nicht im Detail berücksichtigten Entwicklungen die radiologische Lage zeitnah bewerten zu können. Die Analysen zur Erfassung und Bewertung der radiologischen Lage bei nuklearen Gefahrenlagen umfassen vornehmlich Quelltermabschätzungen bzw. Plausibilitätsbetrachtungen sowie die Bewertung radiologischer Folgen möglicher anzunehmender Ereignisabläufe und stützen sich auch auf in der GRS punktuell vorliegende Analysen.

Dazu wurden in dem Forschungsvorhaben

- der Stand von Wissenschaft und Technik systematisch aufbereitet und um die in dem Vorhaben gewonnen Erkenntnisse ergänzt,
- mögliche im Zusammenhang mit radiologischen und nuklearen Gefahren stehende Ereignisabläufe und Freisetzungsmechanismen eruiert, beschrieben, und nach geeigneten Kriterien klassifiziert,
- die zur Bewertung der radiologischen Auswirkungen relevanten Parameter und zusätzlicher Analysebedarf herausgestellt sowie
- der Kenntnisstand der identifizierten Ereignisabläufe weiter recherchiert und aufbereitet, ergänzende Analysen zur Bewertung der radiologischen Lage bei den identifizierten Ereignissen durchgeführt und weiterer Untersuchungsbedarf ausgewiesen.

Die identifizierten und analysierten Freisetzungsmechanismen und Ereignisse wurden auf ihre Relevanz für die Erfassungsmöglichkeiten im Ereignisfall durch das Team Strahlenschutz des GRS-Notfallzentrums bewertet.

In Bezug auf die Gefahrenlage durch Kernwaffenexplosion und Angriffe auf kerntechnische Anlagen wurde untersucht, auf welche Weise die Freisetzungsverläufe im Ereignisfall durch Informationsweitergabe, Beobachtung, Messungen und Modellierung identifiziert, prognostiziert und diagnostiziert werden können. Dafür wurde u. a. ein Prototyp eines Analysetools erstellt zur schnellen Abschätzung von radiologischen und nicht-radiologische Folgen von Kernwaffenexplosionen. Das Tool kann zukünftig im Hinblick auf neue Erkenntnisse weiter angepasst werden.

Hinsichtlich mutwilliger Angriffe auf kerntechnische Anlagen wurde auch untersucht, inwiefern sich die Abläufe auf bereits untersuchte Unfallabläufe in Kernkraftwerken überführen lassen. Die Abschätzung möglicher Freisetzungen des in diesem Vorhaben untersuchten exemplarischen Szenarios ist auf die Übertragung von Erkenntnissen aus analysierten unfallbedingten Ereignisabläufen angewiesen, die im Rahmen deterministischer bzw. probabilistischer Sicherheitsanalysen untersucht wurden.

Durch das Forschungsvorhaben konnte die Kompetenz der GRS auf dem Gebiet nuklearer Gefahrenlagen ausgebaut werden. Durch die Erweiterung der wissenschaftlichen Basis für das Notfallzentrum wurde zum einen die Kenntnis über mögliche Ereignisabläufe und Freisetzungsmechanismen geschaffen, zum anderen wurde eine fundierte Wissensbasis zu Quelltermabschätzungen und radiologischen Konsequenzen als Folge dieser Ereignisabläufe aufgebaut. Das Forschungsvorhaben trägt somit zur Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik auf diesem Gebiet bei.

Literaturverzeichnis

- /ALE 04/ Alekseev, O., Matveev, V., Morenko, A.: Estimation of terrorist attack resistibility of dual-purpose cask TP-117 with DU (depleted uranium) gamma shield, Proc. 14th Int. Symp on the Packaging and Transportation of Radioactive Material (PATRAM2004), Paper # 016. 2004.
- /ARN 22/ Arndt, S., Hollands, T., Köllein, C., Wolff, H., Sogalla, M.: Abschätzung der Quellterme zu postulierten Unfällen mit Versagen des Reaktordruckbehälters in KKW mit WWER-1000, (Rev 1). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 11. März 2022.
- /ATO 22a/ atomicarchive (Hrsg.): Little Boy: A Gun-Type Bomb. Erreichbar unter <https://www.atomicarchive.com/science/fission/little-boy.html>, abgerufen am 21. November 2022.
- /ATO 22b/ atomicarchive (Hrsg.): Fat Man: Implosion-Type Bomb. Erreichbar unter <https://www.atomicarchive.com/science/fission/fat-man.html>, abgerufen am 21. November 2022.
- /ATO 23/ atomicarchive (Hrsg.): Nuclear Fusion: Basics. Erreichbar unter <https://www.atomicarchive.com/science/fusion/index.html>, abgerufen am 6. Februar 2023.
- /BAS 22/ BASE: Zwischenlager für hochradioaktive Abfälle -Sicherheit bis zur Endlagerung. 2022.
- /BBK 16/ Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK): Rahmenkonzeption für den CBRN-Schutz (ABC-Schutz) im Bevölkerungsschutz. 48 S., ISBN 978-3-939347-71-2, 2016.
- /BEC 24/ A.-L. Becker, O. Gerber: Weiterentwicklung numerischer Methoden zur Freisetzungs- und Dosisberechnung für hochdynamische SEWD auf Kernbrennstofftransporte, GRS-794. Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Oktober 2024.

- /BFS 05/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Dezentrale Zwischenlager, Bausteine zur Entsorgung radioaktiver Abfälle. 2005.
- /BFS 15/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): 2. Zwischenbericht zum BMUB-Erlasses „Szenarien für die Notfallschutzplanung“ – exemplarische Quellterme. 2015.
- /BMI 16/ Bundesministerium des Innern (BMI) (Hrsg.): Konzeption Zivile Verteidigung. 70 S., 24. August 2016.
- /BMI 22/ Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI): Zivil- und Katastrophenschutz. Erreichbar unter <https://www.bmi.bund.de/DE/themen/bevoelkerungsschutz/zivil-und-katastrophenschutz/zivil-und-katastrophenschutz-node.html>, Stand von 2022.
- /BMU 98/ Bekanntmachung des Leitfadens Deterministische Sicherheitsanalyse zur Durchführung von Periodischen Sicherheitsüberprüfungen (PSÜ) für Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland vom 25. Juni 1998 (BAnz. 1998, Nr. 153) in der Fassung vom 25. Juni 1998 (Bundesanzeiger), zuletzt geändert 25. Juni 1998.
- /BMU 99/ Atomrechtliche Zuverlässigkeitsüberprüfungs-Verordnung vom 1. Juli 1999 (BGBl. I S. 1525), die zuletzt durch Artikel 17 der Verordnung vom 11. Dezember 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 411) geändert worden ist (AtZüV) zuletzt geändert 1. Juli 1999.
- /BMU 03/ Merkpostenliste für die Sicherung sonstiger radioaktiver Stoffe und kleiner Mengen Kernbrennstoff gegen Entwendung aus Anlagen und Einrichtungen (RdSchr. des BMU vom 10. Juli 2003 - RS I 6 13151-6/18) in der Fassung vom 3. April 2003, zuletzt geändert 3. April 2003.
- /BMU 14/ Bekanntmachung zu der „Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge von Störmaßnahmen oder sonstigen Einwirkungen Dritter (SEWD) auf kerntechnische Anlagen und Einrichtungen (SEWD-Berechnungsgrundlage)“ (Bek. d. BMUB v. 28.10.2014 - RS I 6 – 13151-6/21) in der Fassung vom 28. Oktober 2014, zuletzt geändert 28. Oktober 2014.

- /BMU 20/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.): 2. Diskussionsentwurf des allgemeinen Notfallplans des Bundes nach § 98 des Strahlenschutzgesetzes, ANoPI. 122 S., 6. Februar 2020.
- /BMU 21/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU): Verzeichnis radioaktiver Abfälle (Bestand zum 31. Dezember 2019 und Prognose). 93 S., Januar 2021.
- /BMU 23/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): Allgemeiner Notfallplan des Bundes nach § 98 des Strahlenschutzgesetzes (ANoPI-Bund), Allgemeine Verwaltungsvorschrift der Bundesregierung. 10. November 2023.
- /BMU 24/ Bekanntmachung zu den „Lastannahmen zur Auslegung kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (Lastannahmen Anlagen)“ einschließlich der unterlagerten Dokumente (Bek. d. BMUV v. 10.1.2024 – S I 6 – 1341/0022020.0001) in der Fassung vom 10. Januar 2024, zuletzt geändert 10. Januar 2024.
- /BMUV 22/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): Allgemeiner Notfallplan des Bundes nach § 98 des Strahlenschutzgesetzes (ANoPI-Bund), Referentenentwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, Allgemeine Verwaltungsvorschrift der Bundesregierung. 15. März 2022.
- /BMVG 16/ Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) (Hrsg.): Weißbuch 2016, Zur Sicherheitspolitik und zur Zukunft der Bundeswehr. Berlin, 2016.
- /BUD 18/ Buddemeier, B. R.: Nuclear Detonation Fallout: Key Considerations for Internal Exposure and Population Monitoring. Lawrence Livermore Nationale Laboratory, LLNL-TR-754319, 2018.
- /BUN 20/ Bundeszentrale für politische Bildung: Atommächte. Erreichbar unter <https://www.bpb.de/kurz-knapp/lexika/politiklexikon/296255/atommaechte/>, abgerufen am 29. September 2022.

- /BÜT 12/ Büttner, U., Dokter, S., Güllmann, V., Kaulard, J., Kilian-Hülsmeier, Y., May, H., Mildenerberger, O., Stahl, T., Wetzel, N.: Fukushima Daiichi 11. März 2011, Unfallablauf, radiologische Folgen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-51, 55 S., ISBN 978-3-939355-73-1, Media Cologne Kommunikationsmedien GmbH: Köln, 2012.
- /CEU 14/ Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom (Richtlinie 2013/59/Euratom) in der Fassung vom 5. Dezember 2013 (Amtsblatt der Europäischen Union), zuletzt geändert 17. Januar 2014 (Amtsblatt der Europäischen Union 2014, Nr. L 13, S. 1–73).
- /COM 22/ Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO): CTBTO Preparatory Commission. Erreichbar unter <https://www.ctbto.org/>, abgerufen am 21. November 2022.
- /DHS 09/ Buddemeier, B. R., Dillon, M. B.: Key response Planning Factors for the Aftermath of Nuclear Terrorism. Hrsg.: Department of Homeland Security, Lawrence Livermore Nationale Laboratory, 2009.
- /DHS 16/ U.S. Department of Homeland Security: Health and Safety Planning Guide for Planners, Safety Officers, and Supervisors for Protecting Responders Following a Nuclear Detonation. Washington, DC, 2016.
- /DRO 99/ Droste, B., Probst, U., Heller, W.: Impact of an Exploding LPG Rail Tank Car Onto a Castor Spent Fuel Cask. International Journal of Radioactive Materials Transport, Bd. 10, Nr. 4, S. 231–240, DOI 10.1179/rmt.1999.10.4.231, 1999.
- /DRV 20/ Drever, F., Hentschel, L., Mühr-Ebert, E., Stahl, T.: Untersuchungen zur Ablauforganisation in generischen Lagezentren. Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-585, 2020.

- /EGG 05/ Egger, E., Münger, K.: The dirty bomb: how serious a threat? Hrsg.: Labor Spiez, Schweizerische Eidgenossenschaft, 2005.
- /FED 10/ Federal Radiological Monitoring and Assessment Center: FRMAC Assessment Manual Volume 2, Pre-Assessed Default Scenarios. Department of Homeland Security, 2010.
- /FEMA 10/ Federal Emergency Management Agency (FEMA): Planning Guidance for Response to a Nuclear Detonation, Second Edition, Developed by the National Security Staff Interagency Policy Coordination Subcommittee for Preparedness & Response to Radiological and Nuclear Threats. Juni 2010.
- /FEMA 21/ FEMA: Planning Guidance for Response to a Nuclear Detonation, Third Edition. 2021.
- /GER 23/ O. Gerber, W. Brücher, S. Schierbaum: Experimentelle Untersuchungen eines diskontinuierlichen Freistrahls in Folge einer Hohlladungseinwirkung bei einer Beförderung von Kernbrennstoffen, GRS-732. Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, August 2023.
- /GLA 77/ Glasstone, S., Dolan, P. J.: The Effects of Nuclear Weapons. Department of Defense, Washington, D.C. (USA), Department of Energy, Washington, D.C. (USA), 660 S., DOI 10.2172/6852629, 1977.
- /GRS 01/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (Hrsg.): Bewertung des Unfallrisikos fortschrittlicher Druckwasserreaktoren in Deutschland, Methoden und Ergebnisse einer umfassenden Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA), Entwurf zur Kommentierung. GRS-175: Köln, Oktober 2001.
- /GRS 14/ Büttner, U., Löffler, H., Mildenerger, O., Schmidt, C., Sogalla, M., Stahl, T.: Fortschreibung des Szenarienkatalogs für behördliche Notfallübungen, Abschlussbericht zum Vorhaben 3611S60006. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-A-3770, 115 S.: Köln, November 2014.

- /GRS 18/ Sonnenkalb, M., Band, S., Richter, C., Sogalla, M.: Unfallablauf- und Quelltermanalysen zu den Ereignissen in Fukushima im Rahmen des OECD/NEA BSAF-Projektes Phase II. GRS-Bericht, GRS - 485, ISBN 978-3-946607-69-4, DOI 10.2314/GBV:1028938144, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, April 2018.
- /GRS 22/ Holbein, S., Mühr-Ebert, E., Petermann, I.: Identifikation von Freisetzungsmechanismen und Ereignissen, für die tieferes wissenschaftliches Interesse an theoretischen Möglichkeiten für die schnelle und umfassende Lagebewertung besteht, GRS - 666. Hrsg.: GRS gGmbH, 118 S., März 2022.
- /GRS 24/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Sensitivitätsanalysen zu Unfallablauf und Quellterm zu den Ereignissen in Fukushima, Blöcke 2 und 3 im Rahmen des OECD/NEA Projektes ARC-F, Abschlussbericht, GRS - 684. 2024.
- /HAN 22/ RND/epd: Freisetzung radioaktiver Stoffe aus AKW Saporischschja hätte nur kleine Auswirkungen auf Deutschland. Hannoversche Allgemeine, 17. November 2022.
- /IAEA 11/ International Atomic Energy Agency (IAEA) (Hrsg.): Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities, INFCIRC/225/Revision5. IAEA Nuclear Security Series, INFCIRC/225/Revision5: Vienna, Austria, 2011.
- /IAEA 19/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Nuclear Terrorism: Identifying and Combating the Risks. Stand vom 26. November 2019, erreichbar unter <https://www.iaea.org/newscenter/statements/nuclear-terrorism-identifying-and-combating-risks>, abgerufen am 29. September 2022.
- /IAEA 21a/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Amendment to the Convention on the Physical Protection of Nuclear Material, INFCIRC/274/Rev.1/Mod. 1 (Corrected). 2021.

- /IAEA 21b/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Cumulative Fission Yields, Interactive plots. Erreichbar unter https://www-nds.iaea.org/sgnucdat/2021/cum_all.html, abgerufen am 29. September 2002.
- /IAEA 22/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Nuclear security conventions. Erreichbar unter <https://www.iaea.org/topics/nuclear-security-conventions>, abgerufen am 21. November 2022.
- /INT 16/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Safety of Research Reactors, Specific Safety Requirements No. SSR-3. 152 S., 2016.
- /INT 18/ International Atomic Energy Agency (IAEA): The physical protection of nuclear material and nuclear facilities, Implementation of INFCIRC/225/Revision 5, IAEA Nuclear Security Series No. 27-G. 2018.
- /INT 23/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Research Reactor Database. Erreichbar unter <https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home>, Stand von 2023.
- /KRA 13/ Kraus, T.: Analysis of Fission and Activation Radionuclides Produced by the Detonation of a Uranium-Fueled Improvised Nuclear Device and Identification of the Top Dose-Producing Radionuclides. Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL-JRNL-640177, 2013.
- /KRI 22/ Kristensen, H. M., Korda, M.: Status of World Nuclear Forces. Federation of American Scientists, erreichbar unter <https://fas.org/issues/nuclear-weapons/status-world-nuclear-forces/>, abgerufen am 18. Mai 2022.
- /LÖF 10/ Löffler, H., Mildenerberger, O., Sogalla, M., Stahl, T.: Aktualisierung der Quelltermbibliothek des Entscheidungshilfesystems RODOS für Ereignisse im Leistungsbetrieb, Abschlussbericht zum Vorhaben 3609S60009. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-A-3580: Köln, 30. Oktober 2010.

- /MAG 07/ Magill, J., Hamilton, D., Lützenkirchen, K., Tufan, M., Tamborini, G., Wagner, W., Berthou, V., Zweidorf, A. von: Consequences of a Radiological Dispersal Event with Nuclear and Radioactive Sources. Science & Global Security, Bd. 15, Nr. 2, S. 107–132, DOI 10.1080/08929880701609162, 2007.
- /MAY 19/ Mayer, G., Utschick, M., Babst, S., Heckmann, K.: PSA der Stufe 1 für einen Forschungsreaktor. GRS, Bd. 544, 221 S., ISBN 9783947685295, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, 2019.
- /MOL 14/ Molgaard, J. J.: Production of Nuclear Debris Surrogates for Forensic Methods Development. University of Tennessee, 2014.
- /NAO 13/ Naoteru Odano, Mitsufumi Asami, Hideyuki Oka: Evaluation valuation of radiological consequences due to sabotage during nuclear material transportation, Proceedings of the 17th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM. San Francisco, 2013.
- /NAT 17/ National Urban Security Technology Laboratory: Radiological Dispersal Device (RDD) Response Guidance, Planning for the First 100 Minutes. Department of Homeland Security, 2017.
- /NAT 22/ National Nuclear Data Center: Evaluated Nuclear Structure Data File. Erreichbar unter <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>, abgerufen am 14. September 2022.
- /NATO 14/ North Atlantic Treaty Organization (NATO): ATP-45 WARNING AND REPORTING AND HAZARD PREDICTION OF CHEMICAL, BIOLOGICAL, RADIOLOGICAL AND NUCLEAR INCIDENTS (OPERATORS MANUAL), Edition E Version 1. 2014.
- /NATO 22a/North Atlantic Treaty Organization (NATO): NATO 2022 Strategic Concept. 2022.

- /NATO 22b/ North Atlantic Treaty Organization (NATO): Definitions of Nuclear Forces. Erreichbar unter <https://www.nato.int/docu/glossary/eng-nuclear/eng-app3.pdf>, abgerufen am 29. September 2022.
- /NOR 22/ North Atlantic Treaty Organization (NATO): NATO's nuclear deterrence policy and forces. Stand vom 6. Juli 2022, erreichbar unter https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_50068.htm, abgerufen am 21. November 2022.
- /NTI 20/ Nuclear Threat Initiative (NTI): NTI Nuclear Security Index, Theft Sabotage Radiological, Losing Focus in a Disordered World. 2020.
- /NTI 22/ Nuclear Threat Initiative (NTI): NTI. Erreichbar unter <https://www.nti.org/>, abgerufen am 21. November 2022.
- /OAK 22/ Oak Ridge National Laboratory: ORIGEN. Erreichbar unter <https://www.ornl.gov/project/origen>, abgerufen am 14. September 2022.
- /PAP 14/ Pappas, C., Ikonopoulou, A., Sfetsos, A., Andronopoulos, S., Varvayanni, M., Catsaros, N.: Derivation of the source term, dose results and associated radiological consequences for the Greek Research Reactor – 1. Nuclear Engineering and Design, Bd. 274, S. 100–117, DOI 10.1016/j.nucengdes.2014.04.008, 2014.
- /POP 15/ Pope, N., Hobbs, C.: Insider Threats Case Studies at Radiological and Nuclear Facilities. 2015.
- /ROL 14/ Rolph, G. D., Ngan, F., Draxler, R. R.: Modeling the fallout from stabilized nuclear clouds using the HYSPLIT atmospheric dispersion model. Journal of Environmental Radioactivity, Bd. 136, Nr. 136, S. 41–55, DOI 10.1016/j.jenvrad.2014.05.006, 2014.
- /SPR 20/ Spriggs, G. D., Neuscamman, S. J., Nasstrom, J. S., Knight, K. B.: Fallout Cloud Regimes, LLNL-JRNL-813959. Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), 2020.

- /SSK 15/ Strahlenschutzkommission (SSK) (Hrsg.): Weiterentwicklung des Notfallschutzes durch Umsetzen der Erfahrungen aus Fukushima, Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Februar 2015.
- /SSK 22a/ Strahlenschutzkommission (SSK) (Hrsg.): Strahlennotfallmedizin Handbuch für die medizinische Versorgung und Ausbildung, Empfehlung der Strahlenschutzkommission. 2022.
- /SSK 22b/ Strahlenschutzkommission (SSK): Schutzstrategien bei Nuklearwaffeneinsatz, Schutzwirkungen von Iodblockade und partikelfiltrierenden Halbmasken, Erste vorläufige Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 319. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 29. März 2022. 2022.
- /STO 20/ Stockholm International Peace Research Institute: SIPRI Yearbook 2020, Armaments, Disarmament and International Security. 2020.
- /STO 21a/ Stockholm International Peace Research Institute: SIPRI Yearbook 2021, Armaments, Disarmament and International Security. Hrsg.: Oxford University Press, 2021.
- /STO 21b/ Stockholm International Peace Research Institute: SIPRI Yearbook 2021, Summary. 2021.
- /STO 22/ Stockholm International Peace Research Institute: Yearbook archives. Erreichbar unter <https://www.sipri.org/yearbook/archive>, abgerufen am 29. September 2022.
- /SUB 98/ Sublette, C.: Types of Nuclear Weapons Section 1.0, Nuclear Weapons Frequently Asked Questions. Erreichbar unter <https://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq1.html>, abgerufen am 14. September 2022.
- /TUM 17/ TUM Technische Universität München: Rundherum sicher!, Information für die Bevölkerung nach § 53 Strahlenschutzverordnung. 2017.

- /URE 19/ Urenco: Information der Öffentlichkeit nach der Strahlenschutzverordnung und der Störfallverordnung, 6. Wiederholungsinformation. 6 S., 2019.
- /WAL 08/ Walter, H.: Handling "Dirty Bomb" Szenarios with the Lagrangian Particle Model LASAIR. Präsentation, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 12th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes: Cavtat, Croatia, 2008.
- /WEL 22/ Wellerstein, A.: NUKEMAP. Erreichbar unter <https://nuclearsecrecy.com/nukemap/>, abgerufen am 29. September 2022.
- /ZDF 22/ ZDF: heute journal, Interview mit Sebastian Stransky (GRS gGmbH). 6. September 2022.
- /ZSKG 20/ Gesetz über den Zivilschutz und die Katastrophenhilfe des Bundes Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz (Zivilschutz- und Katastrophenhilfegesetz - ZSKG) in der Fassung von 25. März 1997 (BGBl. I S. 726), zuletzt geändert 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Geschätztes weltweites Kernwaffeninventar von 1945 bis 2022 /KRI 22/	20
Abb. 2.2	Energieverteilung bei einer Kernwaffenexplosion (Fission)	28
Abb. 2.3	Beispiele für Kernwaffenexplosionen für verschiedene Detonationshöhen bei einer Sprengkraft von 1 kT	30
Abb. 2.4	Fat Man: Bombe vom Implosionstyp im 3D-Modell /ATO 22b/	34
Abb. 4.1	Kumulative Spaltausbeute von U-235 (blau) und Pu-239 (gelb) für schnelle Neutronen (0,5 MeV) /IAEA 21b/	65
Abb. 4.2	Spaltproduktkurve nach Berechnungen des Fallout Analysis Tool /MOL 14/	66
Abb. 4.3	Modelldarstellung eines Atompilzes und der Gesamtaktivitätsanteil in jedem definierten Vertikalsegment für eine Explosion von 10 kT /ROL 14/	69
Abb. 4.4	Abschätzung der Sprengkraft (kT) bei bekanntem Winkel zur Ober- oder Unterkante der Wolke und flash-to-bang-time bzw. Entfernung von Ground Zero.....	74
Abb. 4.5	Höhe verschiedener Wolkenparameter im stabilisierten Zustand in Abhängigkeit der Sprengkraft /NATO 14/	75
Abb. 4.6	Zusammenhang zwischen Sprengkraft (yield) und Wolkenhöhe/Radius (cloud height/radius) /GLA 77/	76
Abb. 4.7	Zerfalls- bzw. Aktivitätsrate des Fallouts (Spaltprodukte) nach einer Detonation	80
Abb. 4.8	Anteil an der zeitintegrierten durch externe Strahlung des Fallouts induzierten Dosis für verschiedene Expositionszeiten /KRA 13/	82
Abb. 4.9	Schematische Darstellung des Schadensausmaß in den drei Zonen LD, MD und SD /FEMA 10/	86
Abb. 4.10	Schematische Darstellung der Schadenszonen für eine 10 kT Nuklearwaffenexplosion mit zeitlichem Verlauf /FEMA 21/	89
Abb. 4.11	Dosisreduktionsfaktoren für verschiedene Aufenthaltsorte innerhalb eines Gebäudes und für verschiedene Gebäudetypen /FEMA 21/	92
Abb. 4.12	Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Transmissionsfaktoren R_T und dem Multiplikationsfaktor MF /NATO 14/	95

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Referenzszenarien des Allgemeinen Notfallplans des Bundes /BMU 23/	6
Tab. 2.2	Geschätztes Kernwaffenarsenal weltweit /KRI 22/	17
Tab. 2.3	Nukleare Streitkräfte weltweit, 2020 /STO 20/	21
Tab. 2.4	Weltweites Vorkommen an hochangereichertem Uran und abgetrenntem Plutonium, 2020 /STO 21a/	24
Tab. 3.1	Mit LASAIR berechnete Inhalationsdosis entlang der Ausbreitungsrichtung in Abhängigkeit vom Abstand zum Detonationsort /MAG 07/	43
Tab. 3.2	Freisetzungsanteile für unterschiedliche Unfallszenarien nach /PAP 14/	48
Tab. 4.1	Quellterm von Fallout-Radionukliden (Spalt- und Aktivierungsprodukte) bei uranbasierten Kernwaffen /KRA 13/	67
Tab. 4.2	Anteil der primären Fallout-Aktivität ausgewählter Radionuklide zu drei verschiedenen Zeitpunkten /BUD 18/	68
Tab. 4.3	Partikelgrößenverteilung und prozentualer Anteil der Aktivität nach Partikelgröße (logarithmisch-mittlerer Partikeldurchmesser (μm) (Spalten) und Wolkenhöhe (m) (Zeilen) für die Partikelverteilung aus /GLA 77/, nach /ROL 14/	70
Tab. 4.4	Isodosis-Abstände vom Detonationsort für verschiedene Sprengkräfte /GLA 77/	78
Tab. 4.5	Gesamtenergiedosis aus der Direktstrahlung in verschiedenen Abständen zum Detonationsort für eine Nuklearwaffenexplosion pro kT	79
Tab. 4.6	Eigenschaften der Schadenszonen und Fallout-Zonen am Beispiel einer 10 kT Kernwaffenexplosion	90
Tab. 4.7	Transmissionsfaktoren und Dosisreduktionsfaktoren für verschiedene Schutzunterkünfte /NATO 14/, /FEMA 21/	95
Tab. 4.8	DWR-Freisetzungskategorien sortiert nach Jod-Freisetzungsanteil /LÖF 10/	102

Tab. 4.9	Abgeschätzte Freisetzungsanteile für Reaktorkern und BE-Lagerbecken eines WWER-1000/320 Reaktors bei einem SBO-Fall aufgrund militärischer Einwirkungen für die Varianten 1 „Versagen der Containmentfunktion“ und 2 „Ungefiltertes Containment-Venting“ /ARN 22/	105
Tab. 5.1	Auswahl relevanter Informationen zu den Gefahrenlagen aus Kapitel 4.1 (Kernwaffenexplosion) und Kapitel 4.2 (Angriff auf kerntechnische Anlagen)	108
Tab. 5.2	Auswahl relevanter Beobachtungen bei den Gefahrenlagen nach Kapitel 4.1 (Kernwaffenexplosion) und Kapitel 4.2 (Angriff auf kerntechnische Anlagen)	110

Abkürzungsverzeichnis

ABM	anti-ballistic missile
ANoPI-Bund	Allgemeiner Notfallplan des Bundes
ASW	anti-submarine weapon
AtG	Atomgesetz
BASE	Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMI	Bundesministerium des Innern
BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVg	Bundesministerium der Verteidigung
CASTOR	Cask for storage and transport of radioactive material
CBRN	Chemisch, Biologisch, Radiologisch, Nuklear
CPPNM	Convention on the Physical Protection of Nuclear Material Übereinkommen über den physischen Schutz von Kernmaterial
CTBT	Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty
CTBTO	Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization
DEHEIRO	Dampferzeugerheizrohrbruch
DF	Dangerous Fallout
DWR	Druckwasserreaktor(en)
ECURIE	European Community Urgent Radiological Information Exchange
EIU	Economist Intelligence Unit
EMP	electromagnetic pulse Elektromagnetischer Impuls
ENSDF	Evaluated Nuclear Structure Data File
EU BSS	EU Basic Safety Standards
EURDEP	European Radiological Data Exchange Platform
FAS	Federation of American Scientists
FCB	Fuel channel blockage Kühlkanalblockade
FK	Freisetzungskategorie(n)
GG	Grundgesetz
GZ	Ground Zero
HEU	highly enriched uranium
HYSPLIT	Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory
IAEA	International Atomic Energy Agency

ICBM	intercontinental ballistic missile
IMIS	Integriertes Mess- und Informationssystem
IMS	International Monitoring System Internationales Überwachungssystem
IND	improvised nuclear device Improvisierte nukleare Sprengvorrichtung
IRMIS	International Radiation Monitoring Information System
KFÜ	Kernreaktor-Fernüberwachungssystem
KZV	Konzeption Zivile Verteidigung
LASAIR	Lagrangian Simulation of the Dispersion and Inhalation of Radionuclides
LBBM	land-based ballistic missile
LD	Light Damage
LOCA	Loss of coolant accident Kühlmittelverluststörfall
LWAC	Livermore Weapons Activation Code
MD	Medium Damage
MeV	Megaelektronenvolt
MF	Multiplikationsfaktor
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NEA	Nuclear Energy Agency
NGA	nuklearspezifische Gefahrenabwehr
NTI	Nuclear Threat Initiative
ODL	Ortsdosisleistung
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
ORIGEN code	Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
PRIS	Power Reactor Information System
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
RAKEX	Berechnungs- und Analyse-Tool zur Abschätzung radiologischer und nicht-radiologischer Auswirkungen nach einer Kernwaffenexplosion
RDB	Reaktordruckbehälter
RDD	Radiological Dispersal Device
RIA	Reactivity insertion accident Reaktivitätsstörung
RLB	Radiologisches Lagebild
RLZ-Bund	Radiologisches Lagezentrum des Bundes
RRDB	Research Reactor Database
SBO	Station Black Out

SD	Severe Damage
SEWD	Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter
SIPRI	Stockholm International Peace Research Institute
SLBM	submarine-launched ballistic missile
SNRIU	State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine
SSK	Strahlenschutzkommission
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
UAA Gronau	Urananreicherungsanlage Gronau
USIE	Unified System for Information Exchange in Incidents and Emergencies
vDEC	virtual Data Exploitation Centre
WINO	Wissensbasis für Notfälle
ZSKG	Gesetz über den Zivilschutz- und die Katastrophenhilfe des Bundes

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

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

ISBN 978-3-910548-10-7